



**FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

**Departamento de Engenharia Electrotécnica**

# **GERADOR DE BAIXA ROTAÇÃO PARA APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS**

Por: José Alberto Oliveira Lima

**Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia  
da Universidade Nova de Lisboa  
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica  
e Computadores**

Orientador: Professor Doutor Mário Ventim Neves

Co-orientadora: Engenheira Anabela Gonçalves Pronto

LISBOA

2010



# Agradecimento

*Quando finalizamos um objectivo que nos propusemos realizar, principalmente algo que temos dificuldade em dar por terminado, e fazemos uma retrospectiva do caminho que percorremos, verificamos que esse percurso foi feito por nós, mas não sozinhos. Talvez não o tivéssemos iniciado ou se o iniciássemos talvez não o tivéssemos finalizado, se estivessemos sozinhos.*

*Quero agradecer a todos que me ajudaram, de alguma forma, a conseguir realizar esta Dissertação de Mestrado.*

*Ao Professor Doutor Mário Ventim Neves pela forma sábia e estimulante como orientou o meu trabalho: dando os saberes, feito as correcções necessárias e proporcionando uma grande liberdade de acção.*

*À Engenheira Anabela Gonçalves Pronto, minha co-orientadora, pelo apoio inicial no desenvolvimento do tema e por todo o apoio técnico e empenho que me proporcionou para a aprimoração deste documento.*

*Também agradeço aos Professores do Departamento de Engenharia Electrotécnica, da Universidade Nova de Lisboa, pela forma como ministraram e desenvolveram o Curso e por me terem motivado a evoluir nesta área onde me pretendo realizar profissionalmente.*

*Por último, mas não menos importante, deixo uma palavra de profundo agradecimento aos meus pais, cujo incentivo, apoio e dedicação tornaram este projecto possível.*

*A todos o meu muito obrigado.*



# Sumário

*Para a sustentabilidade da Terra torna-se necessário e urgente que, face às exigências e consumos energéticos actuais, se recorra cada vez mais a energias limpas e renováveis. Sendo o oceano um conhecido recurso deste tipo de energias, a sua exploração poderá trazer grandes benefícios em termos de rendimento energético. No entanto, os recursos tecnológicos necessários para explorar este mercado energético encontram-se, ainda, em fase experimental, não existindo um consenso quanto a tecnologias padrão para o seu uso em grande escala.*

*A presente dissertação pretende dar um pequeno contributo para a investigação e desenvolvimento de um gerador eléctrico rotativo, eficiente em termos de custos e optimizado para ser aplicado em conversores de energia das ondas.*

*Contrariando a tendência actual, em que frequentemente são utilizadas caixas de velocidades para compensar as baixas velocidades de rotação impostas pelo comportamento das ondas oceânicas, neste trabalho é feita uma abordagem de aplicação directa. O fornecimento de potência eléctrica, a partir de potência mecânica de baixa velocidade, exige máquinas eléctricas capazes de gerar elevadas quantidades de binário.*

*De entre as várias topologias apresentadas é seleccionada, para objecto de estudo, a Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes. Esta máquina apresenta uma elevada densidade de binário e potência, diferenciando-se, ainda, das topologias convencionais ao permitir que a densidade de fluxo magnético seja dimensionada independentemente da densidade de corrente eléctrica.*



# Abstract

*The sustainability of Earth urgently demands that, due to the current energy requirements and consumption, we increasingly appeal to clean and renewable energy sources. Being the ocean a well-known resource for this kind of energy, its exploitation may bring great benefits in terms of energetic efficiency. However, the technological resources which are needed to exploit this energy market are still experimental and there is no actual consensus on what should be the standard technologies for large scale approaches.*

*This work intends to give a small contribution to the research and development of a cost efficient rotary electrical generator, optimized to be used in wave energy converters.*

*Against the current trends, where gearboxes are often used to compensate for the low rotational speeds imposed by ocean wave behaviour, a direct drive approach is considered in this work.*

*The supply of electrical power, originated by mechanical low-speed movement, requires the use of electrical machinery capable of generating high amounts of torque.*

*Among the topologies presented in this work, the one selected for further study was the Transverse Flux Permanent Magnet Machine (TFPM). This topology differs from the conventional ones, presenting high power and torque densities and allowing to independently set the current and magnetic loadings in the machine.*





## Lista de Símbolos

$A$	área de secção transversal	[m <sup>2</sup> ]
$A_{cf}$	área de secção do concentrador de fluxo	[m <sup>2</sup> ]
$A_{Enrolamento}$	área de secção transversal do enrolamento	[m <sup>2</sup> ]
$A_g$	área de secção transversal do entreferro	[m <sup>2</sup> ]
$A_{mp}$	área de secção do magneto permanente	[m <sup>2</sup> ]
$A_p$	área de secção do pólo em ‘U’	[m <sup>2</sup> ]
$B$	densidade de fluxo magnético	[T]
$B_g$	densidade de fluxo magnético no entreferro	[T]
$B_{cf}$	densidade de fluxo magnético no concentrador de fluxo	[T]
$B_{mp}$	densidade de fluxo magnético no magneto permanente	[T]
$B_r$	densidade de fluxo magnético remanescente	[T]
$B_p$	densidade de fluxo magnético do pólo em ‘U’	[T]
$e$	força electromotriz induzida	[V]
$E_a$	tensão por fase gerada	[V]
$E_{ar}$	força electromotriz de reacção do induzido	[V]
$E_d$	densidade de energia	[J.m <sup>-2</sup> ]
$E_e$	tensão efectiva gerada por fase	[V]
$E_{ef}$	força electromotriz induzida eficaz	[V]
$E_{máx}$	força electromotriz induzida máxima	[V]
$f$	frequência eléctrica	[Hz]
$f_{mec}$	frequência mecânica	[Hz]
$F_m$	força magnetomotriz	[A]
$H$	campo magnético	[A.m <sup>-1</sup> ]
$H_C$	campo magnético coercivo	[A.m <sup>-1</sup> ]
$H_{C_{ideal}}$	campo magnético coercivo em condições ideais	[A.m <sup>-1</sup> ]
$H_{cf}$	campo magnético no concentrador de fluxo	[A.m <sup>-1</sup> ]
$H_g$	campo magnético no entreferro	[A.m <sup>-1</sup> ]
$H_{mp}$	campo magnético no magneto permanente	[A.m <sup>-1</sup> ]
$H_p$	campo magnético no pólo em ‘U’	[A.m <sup>-1</sup> ]
$h_{rotor}$	altura do rotor	[m]
$h_{enr}$	altura do enrolamento	[m]
$h_{pólo}$	altura do pólo em ‘U’	[m]
$I$	corrente eléctrica	[A]
$I_a$	corrente fornecida por fase	[A]
$I_{ef}$	corrente eficaz	[A]

$K$	constante de razão entre a área do m.p. e a do entreferro	[A]
$l$	distância de percurso magnético	[m]
$L$	indutância magnética	[H]
$l_{cf}$	comprimento do trajecto magnético do concentrador de fluxo	[m]
$l_{enr}$	comprimento do enrolamento	[m]
$l_g$	comprimento do entreferro	[m]
$l_{mp}$	comprimento do magneto permanente	[m]
$l_{pólo}$	comprimento do pólo em ‘U’	[m]
$l_{pólo superior}$	comprimento do pólo superior	[m]
$l_{pólo inferior}$	comprimento do pólo inferior	[m]
$N$	número de espiras	
$N_{mec}$	frequência de rotação mecânica	[rpm]
$P$	potência eléctrica	[W]
$Per_{enr}$	perímetro do enrolamento	[m]
$P_d$	densidade de potência	[W.m <sup>3</sup> ]
$P_{fo}$	potência associada a um metro de frente de onda	[W]
$p_{pólos}$	pares de pólos	
$Q$	potência reactiva	[VAr]
$R_{rôtor}$	raio do rotor	[m]
$R_a$	resistência do enrolamento do induzido	[Ω]
$\Re$	relutância magnética	[H <sup>-1</sup> ]
$\Re_{circ}$	relutância magnética do circuito magnético	[H <sup>-1</sup> ]
$\Re_{Total}$	relutância magnética total da máquina	[H <sup>-1</sup> ]
$S$	potência aparente	[VA]
$S_{Cu}$	secção do enrolamento de cobre	[m <sup>2</sup> ]
$S_{cf}$	secção do concentrador de fluxo	[m <sup>2</sup> ]
$S_g$	superfície de entreferro	[m <sup>2</sup> ]
$S_{mp}$	secção do magneto permanente	[m <sup>2</sup> ]
$S_{rôtor}$	secção do rotor	[m <sup>2</sup> ]
$S_{pólo}$	secção do pólo em ‘U’	[m <sup>2</sup> ]
$T$	binário electromagnético	[N.m]
$T_d$	densidade de binário	[N.m.m <sup>-3</sup> ]
$U_{ef}$	tensão eficaz aos terminais do gerador	[V]
$V_t$	queda de tensão aos terminais do gerador	[V]
$w_{cf}$	comprimento do concentrador de fluxo	[m]
$w_{separador}$	largura do separador central	[m]
$X_a$	reactância de dispersão	[Ω]
$X_L$	reactância indutiva	[Ω]

$X_m$	reactância de magnetização	[ $\Omega$ ]
$Z_a$	impedância aos terminais do gerador	[ $\Omega$ ]
$Z_s$	impedância síncrona	[ $\Omega$ ]
$\mu$	permeabilidade magnética absoluta	[H.m <sup>-1</sup> ]
$\mu_0$	permeabilidade magnética do ar	[H.m <sup>-1</sup> ]
$\mu_{cf}$	permeabilidade magnética relativa do concentrador de fluxo	[H.m <sup>-1</sup> ]
$\mu_{Fe}$	permeabilidade magnética relativa do ferro	[H.m <sup>-1</sup> ]
$\mu_{mp}$	permeabilidade magnética relativa do magneto permanente	[H.m <sup>-1</sup> ]
$\mu_p$	permeabilidade magnética relativa do pólo em ‘U’	[H.m <sup>-1</sup> ]
$\rho_{Cu}$	densidade do cobre	[g.cm <sup>-3</sup> ]
$\theta_{mec}$	ângulo mecânico	[°]
$\theta$	ângulo do passo polar	[°]
$\varphi_{cf}$	ângulo do concentrador de fluxo	[°]
$\varphi_{mp}$	ângulo do magneto permanente	[°]
$\omega$	velocidade angular eléctrica	[rad.s <sup>-1</sup> ]
$\omega_{mec}$	velocidade angular mecânica	[rad.s <sup>-1</sup> ]
$\Delta L_{cf}$	diferença entre a distância real e $w_{cf}$	[m]
$\Delta L_{mp}$	diferença entre a distância real e $l_{mp}$	[m]
$\Delta enr$	distância entre o entreferro e o enrolamento	[m]
$\psi$	fluxo total ligado	[Wb]
$\phi_{ar}$	fluxo magnético de dispersão	[Wb]
$\phi_e$	fluxo efectivo por pólo	[Wb]
$\phi_p$	fluxo por pólo	[Wb]



# Índice

<b>CAPÍTULO 1</b>	20
INTRODUÇÃO	21
1.1. <i>Motivação</i>	21
1.2. <i>Resumo do Trabalho Realizado</i>	21
1.3. <i>Estado da Tecnologia</i>	22
<b>CAPÍTULO 2</b>	23
ENERGIA DAS ONDAS	23
2.1. <i>Introdução</i>	23
2.2. <i>Fonte</i>	23
2.3. <i>Potencial Energético</i>	27
2.4. <i>Panorama Português</i>	29
SISTEMAS DE CONVERSÃO	31
3.1. <i>Introdução</i>	31
3.2. <i>Topologias de Conversão</i>	32
3.2.1. Colunas de Água Oscilantes (Oscillating Water Columns)	32
3.2.2. Dispositivos de Galgamento (Overtopping Devices)	33
3.2.3. Dispositivos de Levantamento (Heaving Devices)	35
3.2.4. Dispositivos de Inclinação (Pitching Devices)	37
3.2.5. Estado de Desenvolvimento dos Sistemas de Conversão	39
3.3. <i>Conversão Electromecânica por Sistema de Aplicação Directa</i>	40
3.4. <i>Aspectos de construção dos dispositivos conversores</i>	41
3.4.1. Escolha dos Materiais	41
3.4.2. Processo de Corrosão	42
3.4.2.1. Revestimentos de Protecção	42
3.4.2.2. Protecção Catódica	43
3.4.3. Crescimento Marinho	44
3.4.3.1. Tintas e Revestimentos Protectores	45
3.4.3.2. Produtos biocidas injectáveis	45
3.4.3.3. Tratamento de Calor	45
3.4.3.4. Tecnologia de pulsos eléctricos	46
3.5. <i>Considerações Ambientais</i>	46

<b>CAPÍTULO 4</b>	47
GERADORES ELÉCTRICOS	47
4.1. <i>Introdução</i>	47
4.2. <i>Topologias Convencionais</i>	47
4.2.1. Máquina Síncrona Convencional	48
4.2.2. Máquina Assíncrona Convencional	49
4.3. <i>Máquina de Fluxo Axial de Magnetos Permanentes (AFPM)</i>	50
4.4. <i>Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes (TFPM)</i>	51
4.4.1. Conceito de Fluxo Transversal	52
4.5. <i>Comparação entre as diversas topologias</i>	53
4.5.1. Topologia de Estator Duplo e Enrolamento Duplo	55
4.5.2. Topologia de Estator Duplo e Enrolamento Simples	56
4.5.3. Topologia de Estator Duplo em 'C' e Enrolamento Simples	57
4.5.4. Topologia de Pólos em Garra	58
4.6. <i>Estrutura Multifásica</i>	59
4.7. <i>Magnetos Permanentes</i>	59
4.7.1. Magneto de Neodímio-Ferro-Boro	61
4.7.2. Magneto de Samário-Cobalto	61
<b>CAPÍTULO 5</b>	63
DIMENSIONAMENTO	63
5.1. <i>Introdução</i>	63
5.2. <i>Circuito Magnético</i>	64
5.3. <i>Expressão da Relutância Magnética</i>	67
5.4. <i>Frequência Eléctrica</i>	67
5.5. <i>Seleção do Magneto Permanente</i>	68
5.6. <i>Cálculo da Recta de Carga</i>	70
5.7. <i>Fluxo Magnético por Pólo</i>	77
5.8. <i>Circuito Equivalente</i>	78
5.8.1. Resistência do Enrolamento	79
5.8.2. Reactância do Enrolamento	80
5.9. <i>Força Electromotriz Induzida</i>	81
5.10. <i>Densidade de Binário</i>	82

<b>CAPÍTULO 6</b> .....	85
SIMULAÇÕES .....	85
6.1. <i>Introdução</i> .....	85
6.2. <i>Estudo da Topologia com Enrolamento Simples</i> .....	86
6.2.1. Ensaio em Vazio .....	87
6.2.2. Ensaio com Carga Puramente Resistiva .....	89
6.2.3. Ensaio com Carga Puramente Indutiva .....	91
6.3. <i>Análise de Parâmetros de Construção</i> .....	93
6.3.1. Espessura do Magneto Permanente e Concentrador de Fluxo .....	93
6.3.2. Distância de Entreferro .....	94
6.3.3. Escalabilidade do Dimensionamento .....	95
6.4. <i>Topologia de Enrolamento Duplo</i> .....	97
6.5. <i>Optimização de Densidade de Binário para a Topologia Dimensionada</i> .....	100
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	103
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	103
7.1. <i>Conclusões</i> .....	103
7.1.1. Ponto de Funcionamento .....	103
7.1.2. Fluxo Ligado e F.E.M. Induzida (Ensaio em Vazio) .....	104
7.1.3. Potência de Saída .....	104
7.1.4. Densidade de Binário .....	105
7.1.5. Escalabilidade e Relação Custo/Binário .....	105
7.2. <i>Recomendações para Trabalho Futuro</i> .....	106
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	109





# Índice de Figuras

Figura 2.1 — Formação da onda oceânica.....	24
Figura 2.2 — Formas de energia presentes nas ondas .....	25
Figura 2.3 — Características físicas da onda oceânica.....	26
Figura 2.4 — Distribuição mundial do recurso disponível em águas profundas em MW/km .....	28
Figura 2.5 — Potencial energético ao longo da costa Portuguesa .....	29
Figura 3.1 — Coluna de água oscilante com turbina de Well.....	32
Figura 3.2 — Dispositivo OWC da ilha do Pico, nos Açores .....	32
Figura 3.3 — Dispositivo de galgamento. ....	33
Figura 3.4 — Dispositivo Wave Dragon. ....	34
Figura 3.5 — Dispositivo de levantamento .....	35
Figura 3.6 — Dispositivo AquaBuoy.....	35
Figura 3.7 — Princípio de funcionamento do dispositivo AquaBuoy.....	36
Figura 3.8 — Dispositivo de inclinação. ....	37
Figura 3.9 — Dispositivo Pelamis.....	37
Figura 3.10 — Sistema de fixação do dispositivo Pelamis.....	38
Figura 3.11 — Sistema de conversão com caixa de velocidades.....	40
Figura 3.12 — Sistema de conversão de aplicação directa.....	41
Figura 3.13 — Sistema de Protecção catódica (ânodo de sacrifício). ....	43
Figura 4.1 — Máquina síncrona convencional .....	48
Figura 4.2 — Máquina assíncrona convencional.....	49
Figura 4.3 — Exemplo de máquina de fluxo axial.....	50
Figura 4.4 — Topologia de fluxo transversal.....	52
Figura 4.5 — TFPM de Estator Duplo e Enrolamento Duplo.....	55
Figura 4.6 — TFPM de Estator Duplo e Enrolamento Simples .....	56
Figura 4.7 — TFPM de Estator Duplo em ‘C’ e Enrolamento Simples .....	57
Figura 4.8 — TFPM com Pólos em Garra .....	58
Figura 4.9 — (a) Rotor com magnetos permanentes embutidos.....	59
Figura 4.9 — (b) Rótor com magnetos permanentes de superfície.....	59
Figura 5.1 — Topologia em análise (TFPM de rotor duplo e enrolamento simples).....	64
Figura 5.2 — a) Sentido do fluxo magnético após meio passo polar.....	64
Figura 5.2 — b) Sentido do fluxo magnético após um passo polar completo.....	65
Figura 5.3 — Trajectória tomada pelo fluxo na topologia em estudo.....	66
Figura 5.4 — Circuito magnético correspondente à topologia em estudo.....	66
Figura 5.5 — Curva de desmagnetização de um magneto permanente e recta de carga ideal.....	69
Figura 5.6 — Densidade de fluxo magnético em função da constante K .....	73
Figura 5.7 — Esquema detalhado para o cálculo das dimensões dos componentes do rotor.....	76
Figura 5.8 — Esquema eléctrico representativo do trajecto magnético de um par de pólos .....	77

Figura 5.9 — Circuito equivalente do gerador eléctrico .....	78
Figura 6.1 — Modelo de Elementos Finitos para a TFPM de estator duplo e enrolamento simples dimensionada. ....	86
Figura 6.2 — Densidade de binário magnético para a TFPM de estator duplo e enrolamento simples .....	87
Figura 6.3 — Direcção do fluxo magnético para a TFPM de estator duplo e enrolamento simples dimensionada .....	88
Figura 6.4 — Resultados da simulação para o ensaio em vazio, com os valores de fluxo ligado e f.e.m. induzida .....	89
Figura 6.5 — Circuito com carga puramente resistiva aos terminais do gerador .....	90
Figura 6.6 — Resultados da simulação para o ensaio com carga puramente resistiva .....	90
Figura 6.7 — Circuito com carga puramente indutiva aos terminais do gerador.....	92
Figura 6.8— Resultados da simulação para o ensaio com carga puramente indutiva, com os valores de f.e.m.....	92
Figura 6.9 — Estudo do ponto óptimo para a espessura do magneto permanente .....	94
Figura 6.10 — Estudo do efeito da variação da distância de entreferro, no fluxo total ligado .....	95
Figura 6.11 — Estudo do efeito da escalabilidade da máquina no binário electromagnético da máquina .....	99
Figura 6.12 — Estudo do efeito da escalabilidade da máquina no custo total da máquina .....	99
Figura 6.13 — Estudo do efeito da escalabilidade da máquina na relação Custo/Binário total da máquina .....	99
Figura 6.14 — Modelo de elementos finitos para a TFPM de estator duplo e enrolamento duplo .....	98
Figura 6.15 — Densidade de fluxo magnético para a TFPM de estator duplo e enrolamento duplo .....	98
Figura 6.16 — Resultados da simulação para o ensaio em vazio da topologia de enrolamento duplo .....	99
Figura 6.17 — Resultados da simulação para o ensaio da topologia de enrolamento duplo optimizada .....	101

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 — <i>Parâmetros inerentes à física das ondas</i> .....	26
Tabela 3.1 — <i>Estado de desenvolvimento dos dispositivos conversores</i> .....	39
Tabela 4.1 — <i>Comparação entre várias topologias de diâmetro equivalente (classe de diâmetros menores)</i> .....	54
Tabela 4.2— <i>Comparação entre várias topologias de diâmetro equivalente (classe de diâmetros maiores)</i> .....	54
Tabela 5.1 — <i>Característica do magneto permanente de NdFeB</i> .....	68
Tabela 5.2 — <i>Dimensionamento para o modelo da topologia em estudo</i> .....	74



## Introdução

### 1.1. Motivação

COMO finalista de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores foi-me dada a oportunidade de escolher, de entre as várias áreas existentes no Departamento de Engenharia Electrotécnica, um tema para investigar e para, posteriormente, realizar uma dissertação de mestrado. A área da Física desde cedo me despertou bastante interesse e curiosidade já que está directamente relacionada com o mundo que nos envolve, projectando-nos para uma visão bastante mais racional sobre a forma como este funciona e fornecendo-nos ferramentas para que possamos interagir com ele. Assim, de entre os temas disponíveis para a realização da dissertação, a área da Energia, em particular a da Energia das Ondas, pareceu-me uma escolha feliz e acertada visto que para além de incidir sobre temas como o electromagnetismo e produção de energia eléctrica, também engloba o movimento de partículas de água e formas de aproveitamento de energia potencial e cinética das ondas do oceano.

### 1.2. Resumo do Trabalho Realizado

A presente dissertação de mestrado tenta fazer uma abordagem qualitativa sobre os principais tipos de conversores de energia das ondas oceânicas e sobre as principais topologias de máquinas eléctricas que permitem o aproveitamento directo e eficiente de energia cinética de baixa rotação.

Sobre as diferentes topologias de geradores eléctricos analisadas são pesados os diversos prós e contras, sendo seleccionada, como objecto de estudo, a Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes, com topologia de concentradores de fluxo pelas suas características favoráveis ao aproveitamento de energia das ondas oceânicas. Esta é alvo de um dimensionamento, através do cálculo dos valores adequados para cada um dos parâmetros de construção da máquina em função das características pretendidas para o gerador eléctrico.

Finalizado o dimensionamento, são realizadas diversas séries de ensaios sobre a máquina, através da utilização de um *software* baseado no método de elementos finitos, sendo que os ensaios são analisados quantitativamente, comparando os valores obtidos a partir dos mesmos com os que seriam esperados de acordo com o dimensionamento efectuado.

A partir das diferentes características e relações obtidas nos ensaios são feitas considerações sobre qual a viabilidade da aplicação da máquina dimensionada em sistemas de conversão à escala real, assim como qual o trabalho futuro necessário para a realização da mesma.

### 1.3. Estado da Tecnologia

O oceano apresenta-se como uma fonte inesgotável de energia limpa e renovável, que se concentra, essencialmente, sob a forma de ondas oceânicas, geradas pela acção dos ventos sobre a superfície do oceano, e de correntes marítimas, causadas pelo efeito das marés e pelas variações de salinidade e temperatura. Existindo, actualmente, uma procura crescente a nível mundial por recursos energéticos, que se revelem alternativas aos recursos existentes extremamente poluentes e de disponibilidade limitada, há que criar condições para a sua exploração de forma sustentável.

A pesquisa relativa à energia das ondas teve início na década de 70 [1], incentivada pela crise petrolífera. Desde então têm sido propostos diversos dispositivos para o aproveitamento deste recurso, apesar de apenas um reduzido número destes terem sido estudados e aplicados em larga escala. Devido à complexidade das características das ondas oceânicas e da hidrodinâmica associada à extracção da energia a partir delas, o desenvolvimento de tecnologias que retirem partido deste recurso necessita de uma pesquisa bastante aprofundada.

Existe, neste momento, um vasto conhecimento sobre os aspectos físicos que estão na base da energia das ondas. No entanto, ainda não existe um consenso sobre a tecnologia que melhor aproveita este recurso.

Nos próximos capítulos será apresentado um trabalho de pesquisa, onde serão estudados os aspectos relativos à formação da onda oceânica, as suas características físicas, tecnologias de conversão, viabilidade económica e, ainda, possíveis impactos ambientais. Toda esta informação será fundamental para uma correcta selecção da topologia de gerador eléctrico que, posteriormente, será alvo de estudo aprofundado.

### Energia das ondas

#### 2.1. Introdução

**C**ONVERTER de forma sustentável a energia cinética das ondas, é um desafio da engenharia e requer o desenvolvimento de novas tecnologias, com métodos de funcionamento e materiais de construção especializados para o efeito. Assim, torna-se essencial entender todos os processos físicos que estão na base da formação da onda oceânica, o potencial energético mundial existente e, ainda, qual o panorama da implementação deste tipo de tecnologia em Portugal e seus contributos para os avanços tecnológicos nesta área.

#### 2.2. Fonte

As ondas oceânicas podem ser consideradas, fundamentalmente, como energia solar concentrada, já que os ventos são deslocamentos das massas de ar, resultantes das diferenças de pressão devidas ao desigual aquecimento da atmosfera. O ar, à medida que se desloca, provoca forças de pressão e atrito que perturbam o equilíbrio da superfície oceânica. Estas forças transferem energia do ar para a água, formando ondas. Este fenómeno é inicialmente de

superfície, dispersando-se em profundidade, de forma mais lenta, dando origem a correntes circulares. Sendo a densidade da água maior do que a do ar, a densidade de energia transportada por esta também é maior.

Outro aspecto relativo às ondas oceânicas é que são geradas ao largo da costa e percorrem grandes distâncias, sem perdas de energia significativas, excepto quando se encontram expostas a ventos de sentido contrário. Ao aproximarem-se da costa sofrem um amortecimento, devido à sua interacção com zonas de menor profundidade.

Pensa-se que os locais mais aptos a serem explorados estarão a alguns quilómetros da costa, em águas que tenham uma profundidade entre 50 e 100 metros.

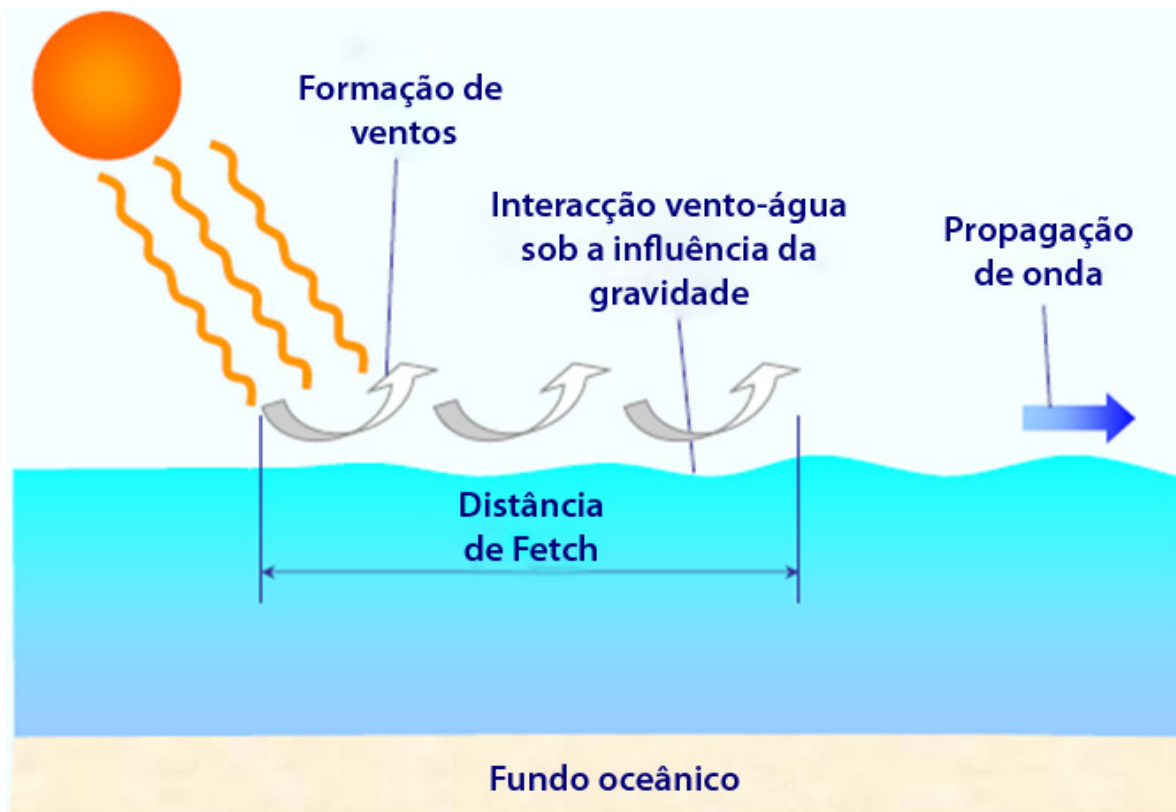


Figura 2.1—Formação da onda oceânica [2].



As ondas do mar incorporam duas formas de energia: energia cinética das partículas de água, que formam, normalmente, trajectórias orbitais; e energia potencial de partículas de água, que são elevadas.

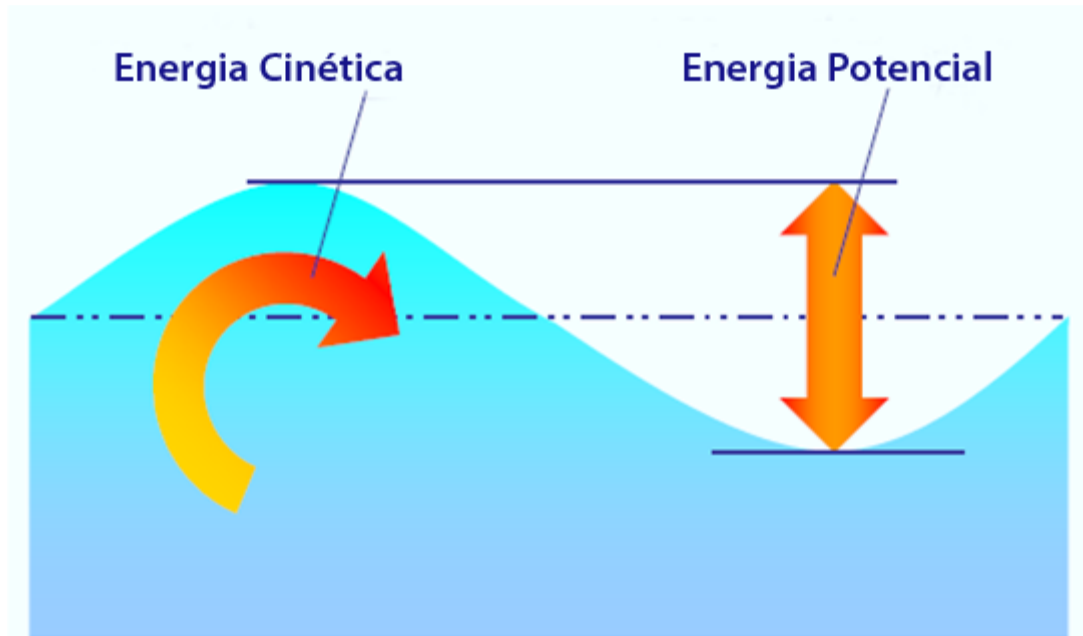


Figura 2.2 —*Formas de energia presentes nas ondas* [2].

Quando as ondas são formadas em águas profundas, as partículas próximas da superfície movem-se em trajectórias circulares. Já em águas pouco profundas, em que a profundidade é menor que o comprimento de onda, as trajectórias das partículas tendem a ser comprimidas em elipses [2].

À medida que a amplitude de onda aumenta, as trajectórias das partículas deixam de formar órbitas fechadas. Em vez disso, após a passagem de cada crista, as partículas são deslocadas um pouco para a frente das suas posições anteriores. Este fenómeno é conhecido por *Stokes drift*.

A figura seguinte apresenta as características físicas de uma onda oceânica comum.

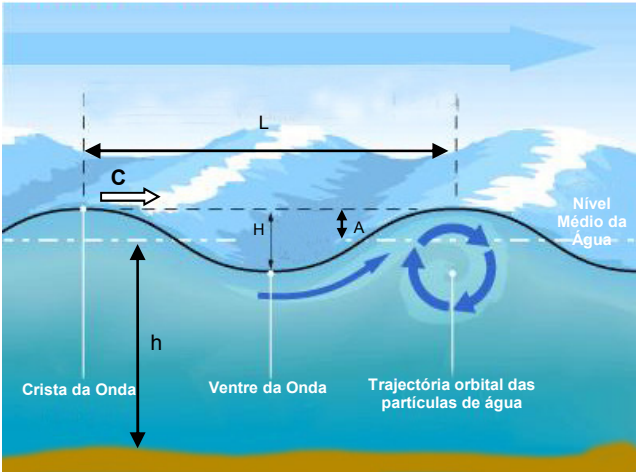


Figura 2.3—Características físicas da onda oceânica.

Na tabela 2.1 encontram-se descritos os parâmetros inerentes à física das ondas e seus significados, assim como as respectivas unidades SI.

PARÂMETROS	
SWL	Nível médio da superfície da água
$E_d$	Densidade de energia de onda [ $J/m^2$ ]
$E_{fo}$	Energia por metro de frente de onda [ $J/m$ ]
$P_d$	Densidade de potência de onda [ $W/m^2$ ]
$P_{fo}$	Potência por metro de frente de onda [ $W/m$ ]
$h$	Profundidade abaixo de SWL (m)
$\omega$	Frequência de onda [rad/s]
$\lambda$ (ou $L$ )	Comprimento de onda = $gT^2/(2\pi)$ [m]
$\rho_{am}$	Densidade da água do mar [ $1000\text{ kg/m}^3$ ]
$g$	Constante gravitacional [ $9.81\text{ m/s}^2$ ]
$A$	Amplitude de onda [m]
$H$	Altura de onda [m]
$T$	Período de onda [s]
$C$	Celeridade (velocidade de frente de onda) [m/s]

Tabela 2.1 — Parâmetros inerentes à física das ondas

A partir de [3] é possível retirar as expressões associadas à energia transportada e potência existente numa onda:

— *Densidade de energia  $E_d$*

$$E_d = \frac{\rho_{am} \cdot g \cdot H^2}{8} \quad (2.1)$$

— *Densidade de potência  $P_d$*

$$P_d = \frac{E_d}{T} = \frac{\rho_{am} \cdot H^2}{8 \cdot T} \quad (2.2)$$

— *Potência associada a um metro de frente de onda  $P_{fo}$*

$$P_{fo} = C \cdot E_d = \frac{\rho_{am} \cdot g^2 \cdot H^2}{16 \cdot \omega} \quad (2.3)$$

Da equação 2.1, verifica-se que a energia transportada pelas ondas é proporcional ao quadrado da amplitude e ao período. Por um lado, sendo maior a amplitude, maior é a massa de água transportada. Por outro lado, observa-se que ondas de maior período se deslocam a velocidades superiores. Na verdade o estado do mar resulta, em cada lugar e momento, da sobreposição linear dum grande número de ondas, estabelecendo-se um espectro de ondas para o descrever.

A potência média em ondas de período e amplitude elevados, normalmente, excede os 40-50 kW por metro de comprimento da onda incidente.

## 2.3. Potencial Energético

O potencial energético, a nível global, existente nas ondas oceânicas, está estimado em 8000-80.000 TWh/ano [4].

A figura 2.4 mostra que os melhores climas, a nível de energia das ondas, com níveis de potência médios situados entre os 20-70 kW/m ou superiores, se encontram em zonas temperadas, dos 30 aos 60 graus de latitude, onde ocorrem fortes tempestades. Existem, ainda, zonas nos  $\pm 30$  graus de latitude onde sopram ventos mais regulares, compensando os menores níveis de picos de potência, pela menor variação de potência das ondas [4].

Existem grandes variações nos níveis de potência com o passar de cada onda, de dia para dia e de mês para mês. A variação sazonal é, normalmente, favorável em zonas de clima temperado, já que a energia das ondas, tal como a energia eólica, atinge o seu pico máximo nos meses de inverno, coincidindo com o pico de procura de energia eléctrica.

À medida que se aproximam das linhas costeiras, as ondas podem modificar-se de várias formas, conduzindo a alterações de direcção, devido à refacção; e de potência, devido a perdas originadas por atrito com o fundo marinho e pela rebentação de ondas.

A refacção pode causar a concentração de energia das ondas, em locais denominados de *hot spots*, ao longo de um fundo marinho convexo. Este comportamento é observado com frequência nas proximidades de cabos. O efeito oposto, geralmente, ocorre em zonas de baía.

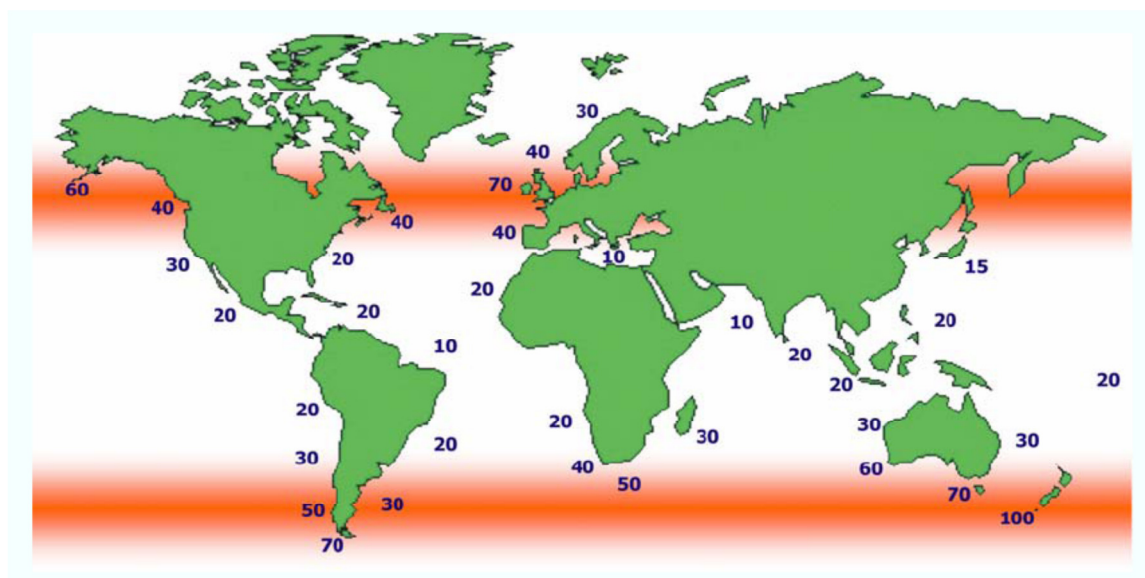


Figura 2.4 — Distribuição mundial do recurso disponível em águas profundas em MW/km [5].

A energia das ondas é uma das formas de energia dos oceanos que apresenta, actualmente, maior potencial de exploração, tendo em conta a força das ondas e a imensidão dos oceanos.

## 2.4. Panorama Português

Portugal prefigura-se como um local com potencialidades no domínio da energia das ondas, já que possui uma extensa costa com uma densidade de energia relativamente elevada, tal como pode ser observado na figura 2.5, estimando-se em 15 GW [6] a potência disponível média para Portugal continental.

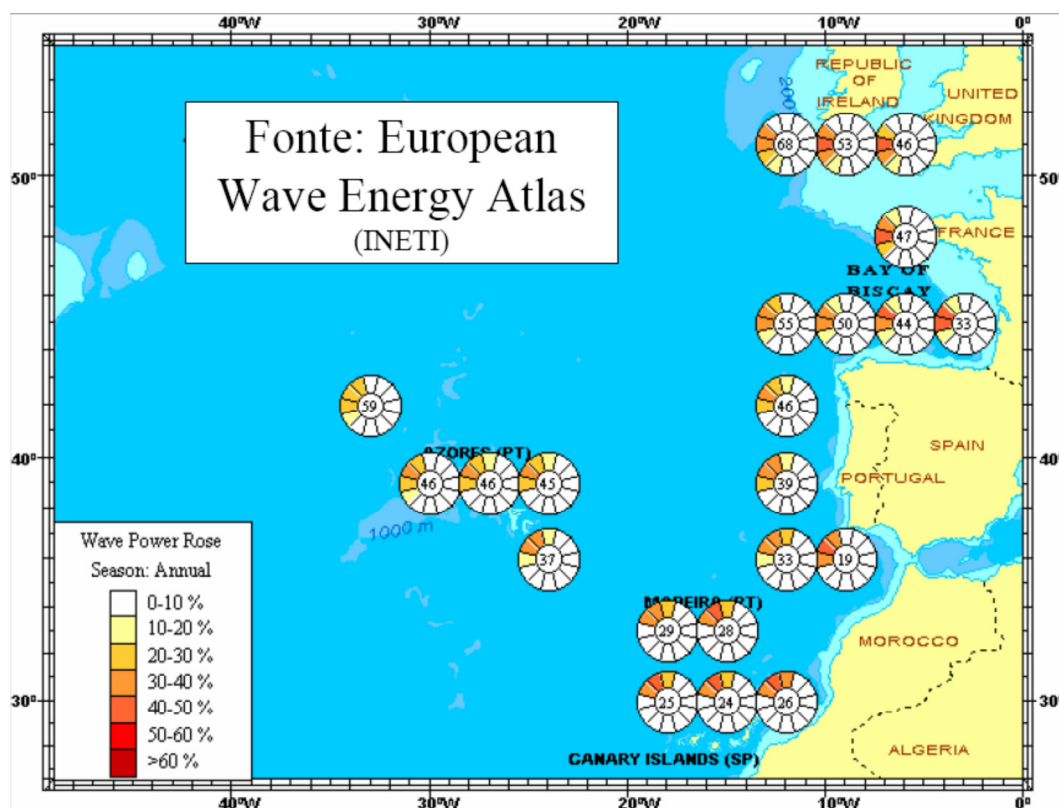


Figura 2.5 — Potencial energético ao longo da costa portuguesa [5].

A sua contribuição para a produção de energia eléctrica permanece uma incógnita. É desconhecida a capacidade que pode ser aproveitada e o rendimento que poderá ser obtido devido às condicionantes geomorfológicas e tecnológicas. Estimativas sugerem que cerca de 10TWh, ou seja, perto de 20% do consumo eléctrico nacional [6], estariam ao alcance dos equipamentos e dos locais assinalados.

A forte implantação da rede eléctrica nacional no litoral do país, onde os consumos são mais elevados, deverão contribuir para facilitar a ligação destes dispositivos a um sistema de distribuição de energia.

Outro aspecto relevante prende-se com os incentivos tarifários para produtores distribuídos que utilizam energias renováveis e são reconhecidos, legalmente, como produtores em regime especial.

Com a crise petrolífera dos anos 70, Portugal recebeu um forte incentivo à investigação deste recurso energético e foi local de diversas experiências [1]. A constituição de unidades de investigação tiveram concretização em modelos à escala real, acompanhados de projectos de investimento em parques a serem ligados à rede nacional. Assinale-se as experiências com a central de coluna de água oscilante, de 400 kW, da ilha do Pico, ou mais recentemente, os testes com a central *AWS*, de 2 MW, instalada na Póvoa de Varzim e o projecto com o dispositivo *Pelamis*, de  $3 \times 250$  kW, ao largo da localidade de Aguçadoura.

### Sistemas de Conversão

#### 3.1. Introdução

A conversão de energia a partir das ondas apresenta claras semelhanças com a conversão de energia eólica. Dado que as ondas são produzidas pela acção do vento, os dois recursos apresentam idêntica irregularidade e variação sazonal e em ambos os casos se extrai energia dum meio fluido em movimento e de extensão praticamente ilimitada.

A natureza ondulatória do mar, em comparação com o simples movimento, de velocidade mais ou menos constante, do vento, está na origem da maior complexidade de concepção de sistemas de conversão.

Em compensação o recurso energético das ondas apresenta maior concentração espacial, numa camada de algumas dezenas de metros abaixo da superfície, do que a energia eólica. Em ambos os casos, os sistemas de aproveitamento são modulares, com potências instaladas por unidade previsivelmente inferiores à dezena de MW.

Em contraste com outras fontes de energias renováveis, existe uma grande variedade de sistemas de conversão para energia das ondas. Apesar de existirem mais de um milhar de técnicas de conversão patenteadas, o aparente grande número de conceitos para conversores de energia das ondas, podem ser dividido em alguns tipos distintos, consoante o seu princípio de funcionamento.

De seguida serão analisados cada um dos principais tipos de topologia de conversão, assim como algumas considerações necessárias face a estes.

## 3.2. Topologias de Conversão

### 3.2.1. Colunas de Água Oscilantes (Oscillating Water Columns)

As colunas de água oscilantes são estruturas parcialmente submersas, em que a incidência das ondas provoca sucessivas compressões e descompressões de ar, dentro de um compartimento, accionando uma turbina.



Figura 3.1 — Coluna de água oscilante com turbina de Wells[7].

A turbina deverá manter o sentido de rotação independentemente do sentido de escoamento do ar. Para tal poderá ser utilizada uma turbina *Wells* ou um conjunto de válvulas rectificadoras.

O princípio de funcionamento da coluna de água oscilante permite estabilizar a produção de energia eléctrica, através do acoplamento de um gerador eléctrico ao veio da turbina, cuja velocidade de rotação é mantida num determinado intervalo.

Um exemplo deste tipo de dispositivo *OWC* está instalado na ilha do Pico, nos Açores.

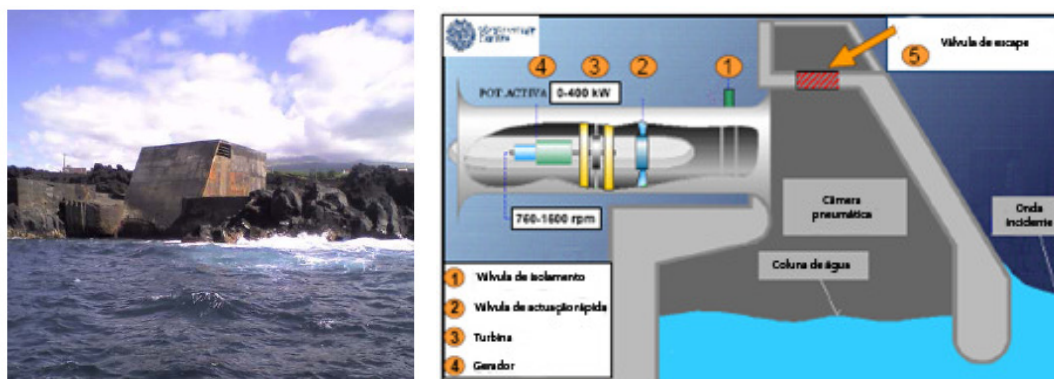


Figura 3.2 — Dispositivo OWC da ilha do Pico, nos Açores[7].



Esta central está equipada com uma turbina de *Wells*, disposta na horizontal, com velocidade rotativa limitada entre 750 (velocidade síncrona) e 1500 rpm. Nela foi adoptado um gerador assíncrono de rotor bobinado de 400kW, e, no topo da câmara de ar, foi desenhada e instalada uma válvula de escape, para permitir a dissipação de energia para a atmosfera em casos de mar demasiado energético.

Apesar de só ter ocorrido pontualmente, e durante a fase de ensaios, foi nesta central, que um dispositivo introduziu, pela primeira vez, energia eléctrica numa rede, produzida a partir da conversão de energia das ondas.

Embora a coluna de água oscilante tenha sido um dos primeiros sistemas a ser estudados e, como tal, ser uma solução primeiramente costeira, é actualmente considerada tecnológica e economicamente menos competitiva que as soluções de parques de dispositivos em alto mar (*offshore*).

### 3.2.2. *Dispositivos de Galgamento (Overtopping Devices)*

Os dispositivos de galgamento procedem ao encaminhamento das ondas para reservatórios elevados acima do nível do mar, utilizando rampas de separação entre o reservatório elevado e a água do mar que rodeia o dispositivo.

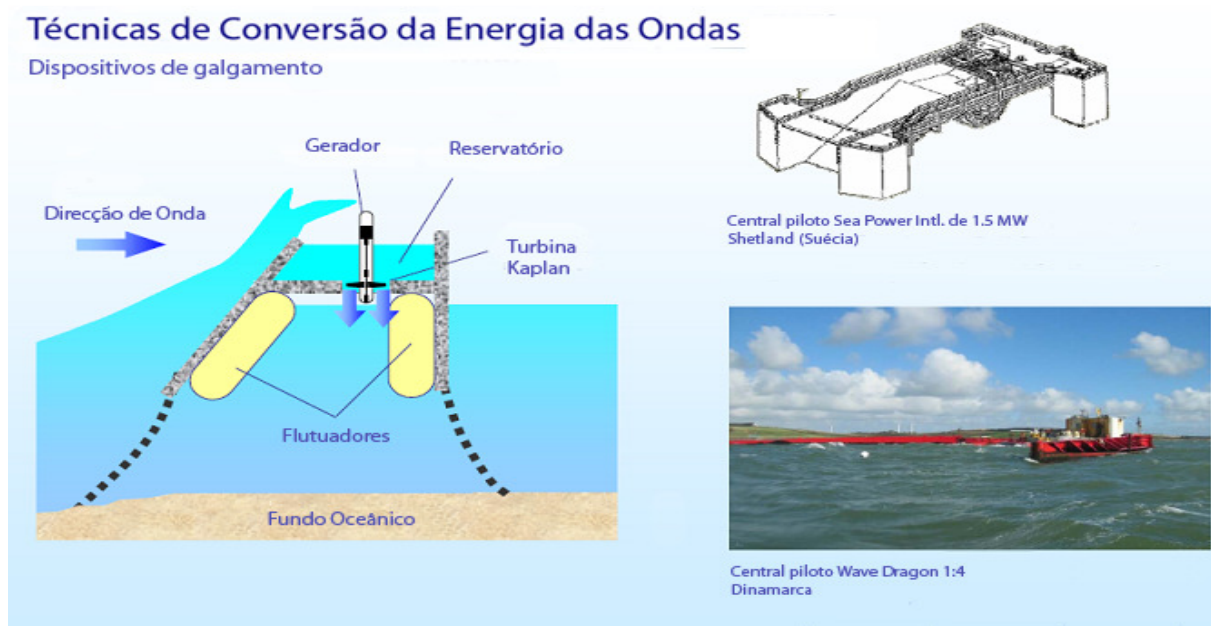


Figura 3.3 — *Dispositivo de galgamento*[7].

Ao galgarem a rampa, as ondas depositam a água do mar no reservatório elevado. Quando esta água armazenada é de novo despejada para o mar, passa através duma turbina hidroelétrica de baixa queda.

Este funcionamento pode ser comparado ao de uma central mini-hídrica flutuante, cujo princípio de funcionamento é em tudo semelhante ao de um aproveitamento hidroelétrico convencional.

Um caso de aplicação deste tipo de dispositivo é o *Wave Dragon*, que consiste num dispositivo de galgamento afastado da costa (*offshore*).

Com potências nominais que podem ir dos 4 aos 11 MW (consoante o clima de ondas) o *Wave Dragon*, construído na Dinamarca, foi o primeiro dispositivo *offshore* a introduzir energia eléctrica numa rede. O sistema consiste, basicamente, em rampas que conduzem as ondas incidentes para um reservatório. Este armazena a água que entretanto galgou as rampas e que, ao ser vazada para o mar, acciona um determinado número de turbinas de baixa queda, com velocidades de rotação que podem atingir as 290 rpm [7], através das quais a energia eléctrica é produzida.

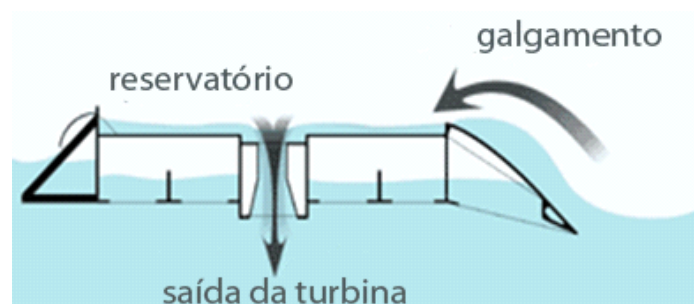


Figura 3.4 — Dispositivo *Wave Dragon* [7].

### 3.2.3. *Dispositivos de Levantamento* (Heaving Devices)

O dispositivo de levantamento aproveita o movimento ondulatório e converte-o em movimento linear ou rotativo, através de sistemas mecânicos e/ou hidráulicos, de modo a accionar geradores eléctricos.

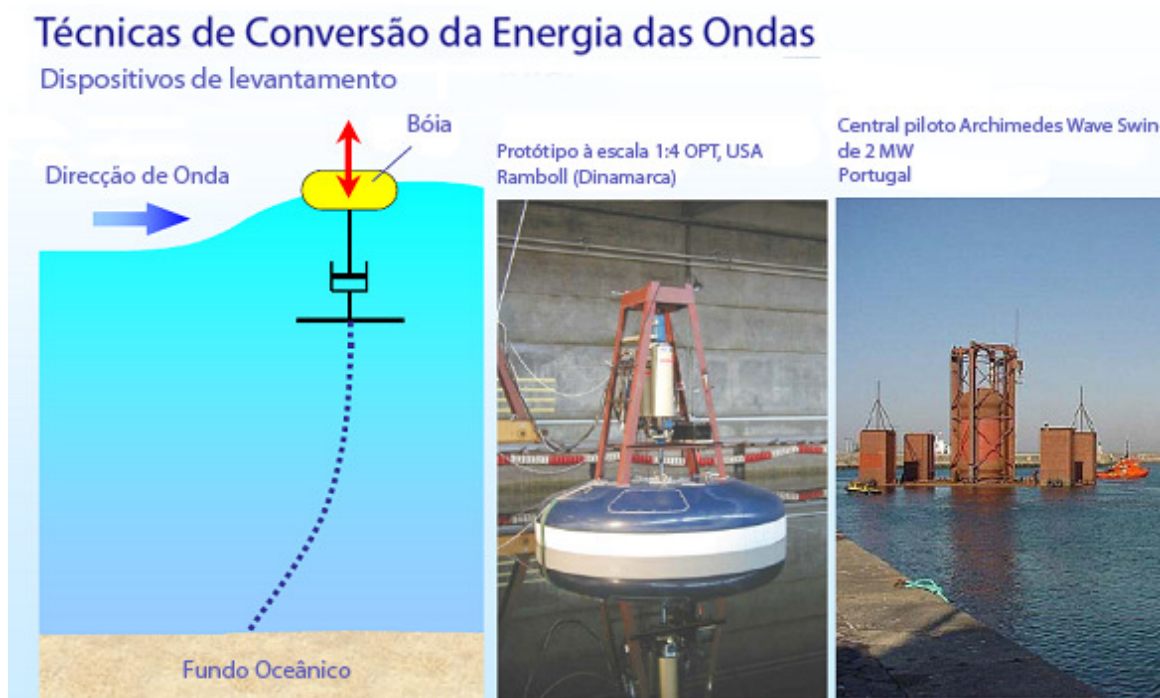


Figura 3.5 — *Dispositivo de levantamento*[7].

Um exemplo deste tipo de dispositivo é o *AquaBuoy* que consiste num dispositivo de conversão da classe dos corpos flutuantes (absorção pontual), que reage face a um tubo submerso, cheio com água.



Figura 3.6 — *Dispositivo AquaBuoy* [8].

O *AquaBuoy* aproveita a componente vertical da energia cinética da onda para pressurizar a água salgada, através de uma mangueira elástica reforçada com aço, existente no tubo.

### **AquaBu0Y - Princípio de Funcionamento**

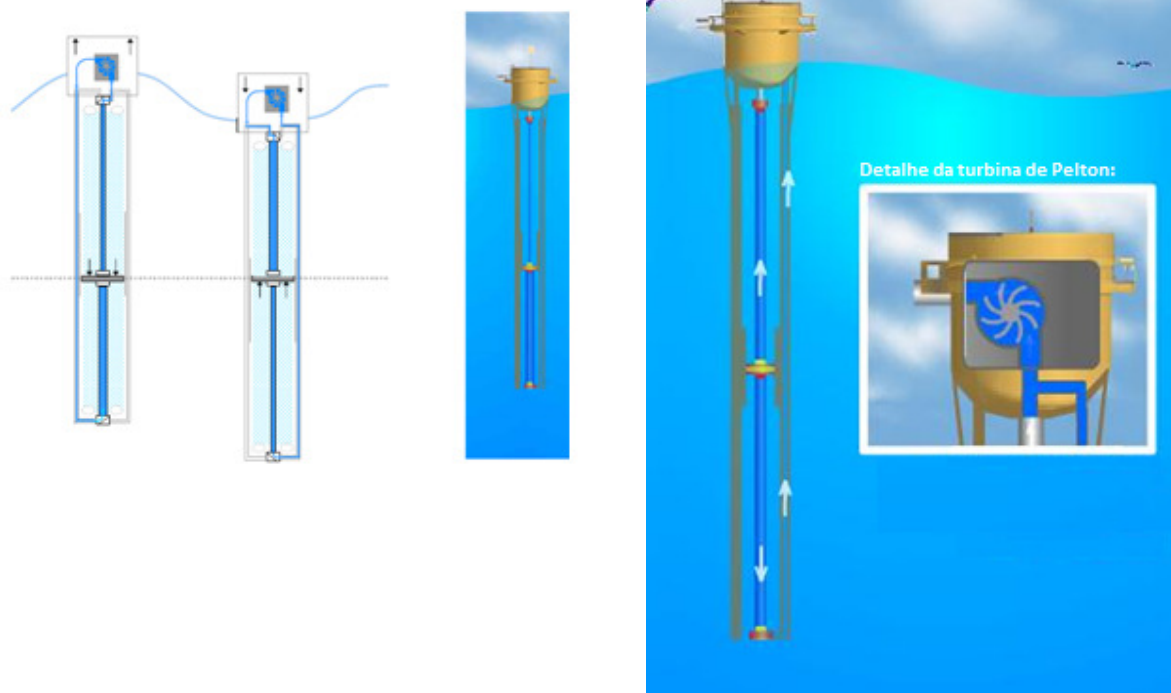


Figura 3.7 — *Princípio de funcionamento do dispositivo AquaBuoy* [8].

Tanto os movimentos ascendentes, como os descendentes, são aproveitados para exercer pressão sobre a água, funcionando a mangueira como uma bomba. Seguidamente, a água salgada pressurizada é conduzida para um sistema de conversão, que consiste num gerador eléctrico accionado por uma turbina. A energia eléctrica é transmitida até à zona costeira, através de uma linha de transmissão subaquática. Cada dispositivo implantado tem uma potência de 250 kW [8].



### 3.2.4. *Dispositivos de Inclinação (Pitching Devices)*

Os dispositivos de inclinação são constituídos por um determinado número de corpos flutuantes, articulados entre si. Os movimentos relativos, entre os corpos flutuantes, são usados para bombear, através de motores hidráulicos, óleo a elevada pressão, accionando assim os geradores eléctricos.

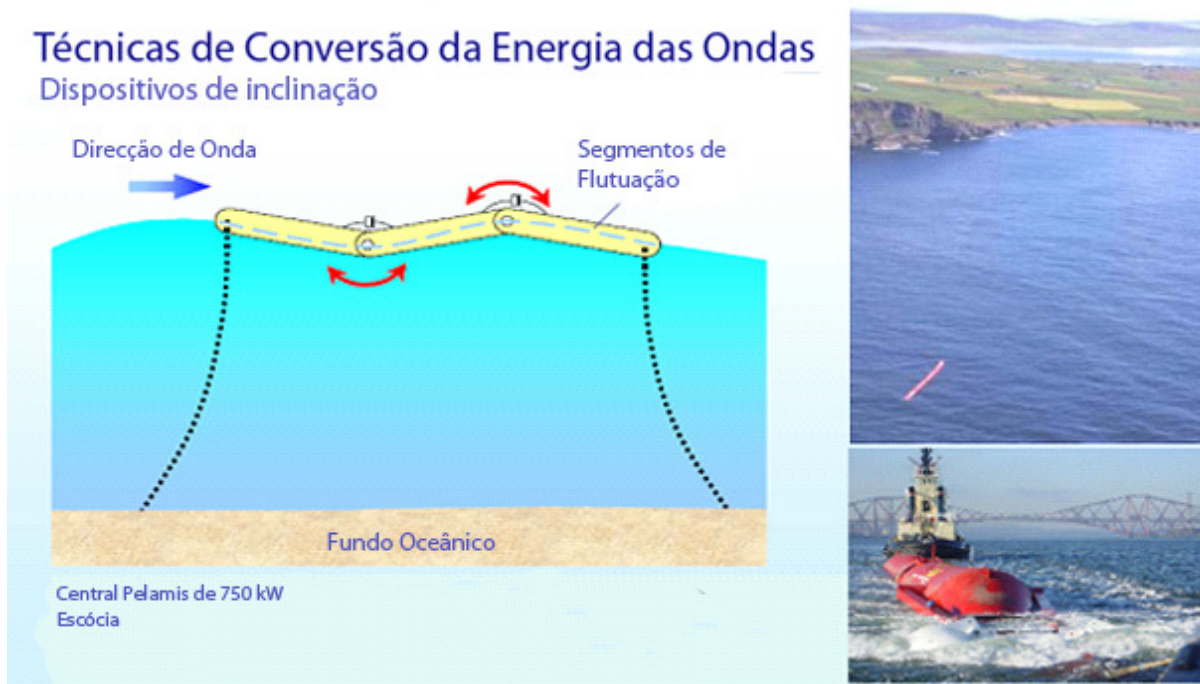


Figura 3.8 — *Dispositivo de inclinação*[7].

O esquema lateral representado é relativo ao *Pelamis*. O sistema consiste, basicamente, numa estrutura articulada semi-submersa, composta por diferentes módulos cilíndricos, que se encontram unidos por juntas flexíveis.

O movimento ondulatório das ondas incidentes, a partir da oscilação dos módulos cilíndricos em torno das juntas que os unem, provoca a pressurização do óleo. Este, ao ser forçado a passar por motores hidráulicos, conduzirá ao accionamento de geradores eléctricos, produzindo energia eléctrica.



Figura 3.9 — *Dispositivo Pelamis* [9].

Cada dispositivo contará com quatro tubos circulares e três módulos de conversão de energia, perfazendo uma capacidade unitária do dispositivo igual a 750 kW, sendo o seu comprimento de 120 m e o diâmetro externo igual a 3,5 m [8].

O *Pelamis* foi concebido tendo em mente a sua implementação em parques, pelo que não é de estranhar o facto de a energia extraída de todos os três módulos de cada dispositivo, ser retirada e enviada para terra através de um único cabo. Esta característica é particularmente relevante, numa perspectiva de minimização de custos, quando esteja presente um elevado número de dispositivos.

Outras variáveis tiveram particular importância na concepção do dispositivo. Por um lado, houve a tentativa de serem utilizados componentes já existentes na indústria *offshore* (foi do entendimento da empresa que, logo que fique claro que o dispositivo seja viável essa mesma indústria, irá produzir componentes mais eficientes e a um custo, extraordinariamente, mais reduzido do que o actual); por outro lado, a sobrevivência do dispositivo foi identificada como parâmetro fulcral em todo o processo de desenvolvimento, prioritário até sobre as tentativas para melhorar o rendimento da conversão de energia.

Uma das componentes importantes do *Pelamis* é o seu sistema de fixação ao fundo do mar que, dadas as características do dispositivo, assume uma relevância fundamental.

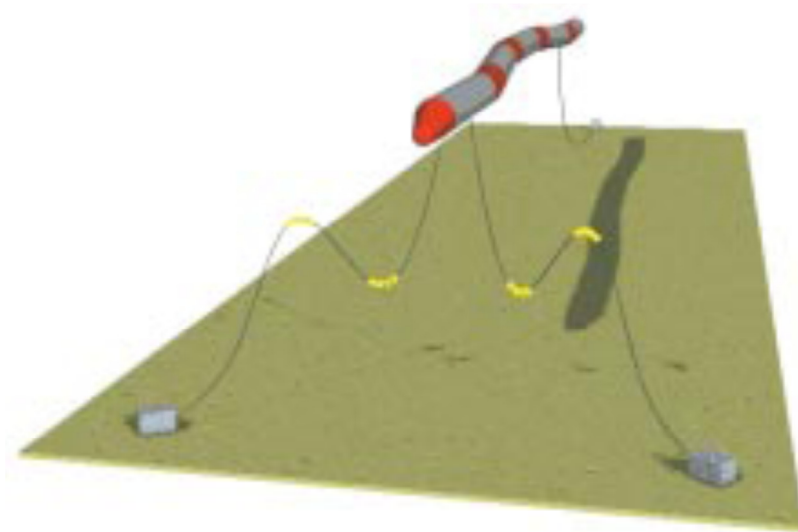


Figura 3.10 — Sistema de fixação do dispositivo *Pelamis* [9].

### 3.2.5. Estado de Desenvolvimento dos Sistemas de Conversão

Tal como foi dito no capítulo 1, apesar de existirem inúmeros conceitos para dispositivos de aproveitamento da energia das ondas, não existe um consenso sobre a tecnologia que tirará melhor partido deste recurso. Enquanto alguns dispositivos já utilizam conceitos testados e comprovados, outros ainda permanecem apenas como teóricos. Na tabela 3.1 é possível observar alguns exemplos destes casos.

	Apenas em conceito	Teórico / tanque de ondas	Protótipo à escala	Protótipo em tamanho real	Investigação em curso
Aqua Energy Aquabuooy					●
Archimedes Wave Swing					●
Backward Bent Duck Buoy					●
DWP Float Pump					
Energetech OWC					●
Floating Wave Power Vessel					●
Hosepump (Sueco)					
Limpett OWC					●
McCabe Wavepump					●
Mighty Wale					
Osprey					
Pelamis					●
Pendulor					
Pico Azores OWC					●
Point Absorber (Dinamarca)					
PS Frog					
Salter Duck					
Sloped IPS Buoy					●
Sperboy					●
TAPCHAN					
TMOWC					●
Unión Eléctrica Fenosa OWC					●
Wave Dragon					●
Wave Plane					●
Wave Rotor					●
Wavebob					●
WaveGen Project X					●

Tabela 3.1 — Estado de desenvolvimento dos dispositivos conversores [4].

Verifica-se que a maior parte destes dispositivos se encontra, ainda, na fase de estudo teórico, ou de protótipo à escala. Poucos são os dispositivos que já foram postos à prova como protótipos à escala real. Mesmo estes, à excepção de alguns casos raros, continuam sobre investigação permanente.

### 3.3. Conversão Electromecânica por Sistema de Aplicação Directa

O meio oceânico é um meio instável e variável. Um sistema que tenha como objectivo converter energia mecânica, proveniente das ondas do mar, em energia eléctrica, deverá estar preparado para gerar, com relativa qualidade e eficiência, energia que cumpra os requisitos funcionais da rede eléctrica a que se encontra ligado. Dada a natureza da energia existente nas ondas do mar se traduzir num movimento ondulatório de baixa frequência, um grande número de dispositivos de conversão estão sujeitos a trabalhar a velocidades de rotação bastante baixas. Estes dispositivos carecem assim de sistemas adicionais que permitam a conversão eficiente deste tipo de energia. Existem várias formas de conseguir este resultado utilizando uma caixa de velocidades, como intermediário entre o sistema colector e o gerador eléctrico.

Na figura 3.11 encontra-se representado um sistema de conversão com caixa de velocidades. O veio do gerador eléctrico encontra-se ligado ao veio do colector de energia das ondas através de um caixa de velocidades de incremento. A caixa de velocidades é introduzida de forma a ajustar a baixa rotação, resultante do sistema colector, para a velocidade de rotação superior de um gerador eléctrico convencional. A energia eléctrica é então entregue à rede por intermédio de um conversor AC/AC.

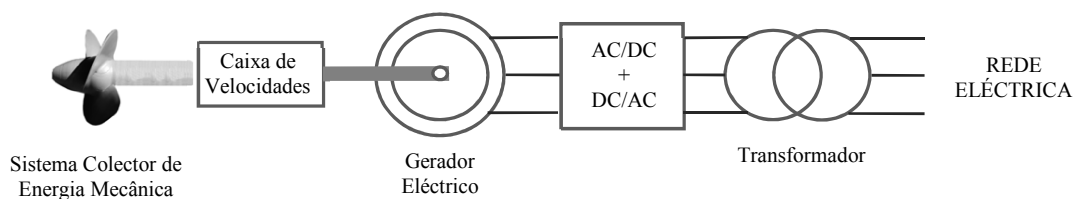


Figura 3.11 — Sistema de conversão com caixa de velocidades.

Existem, porém, algumas desvantagens em relação à utilização de uma caixa de velocidades. Tal sistema irá presenciar vibrações e dissipações de calor, causadas pelo atrito resultante da mudança de velocidades, e estará ainda sujeito a manutenções regulares dado o desgaste e a necessidade de substituições de óleo da caixa de velocidades.

Com os sucessivos avanços nos sistemas colectores de energia das ondas, as questões relacionadas com a disponibilidade e fiabilidade das unidades de geração de energia revelam-se bastante importantes, particularmente em unidades instaladas longe da linha costeira, com acesso difícil e demorado. Pelas razões apontadas, um sistema de conversão que utilize uma caixa de velocidades verá, naturalmente, a fiabilidade reduzida. Assim, fará sentido analisar as vantagens e desvantagens da utilização de um sistema de aplicação directa, onde não será necessária a presença de uma caixa de velocidades.



Na figura. 3.12 encontra-se representado um sistema de conversão de aplicação directa.

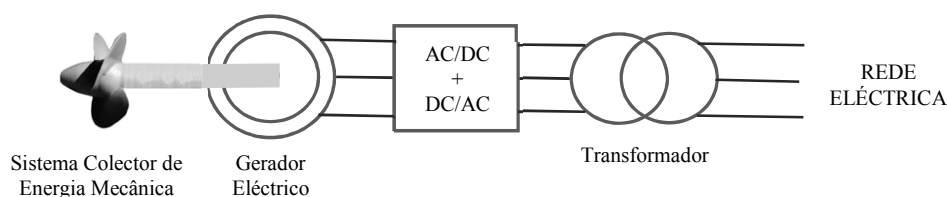


Figura 3.12 — *Sistema de conversão de aplicação directa.*

Num sistema de aplicação directa, a velocidade de rotação do veio do colector será a velocidade do veio do gerador eléctrico. Para este caso, de forma a gerar a mesma potência que um gerador convencional ligado a uma caixa de velocidades, será necessário um gerador optimizado para funcionar a baixas rotações, com elevado número de pólos e, por conseguinte, elevado binário nominal. Uma máquina com estas características terá um custo e uma dimensão bastante superior a uma máquina convencional que funcione, por exemplo, a 1500 *rpm*. Porém, a introdução de magnetos permanentes mais baratos e com maior produto energético tem tornado este sistema numa alternativa cada vez mais atractiva.

Será alvo desta dissertação estudar e dimensionar uma topologia de aplicação directa, que demonstre ser eficiente e economicamente viável, para a conversão de energia das ondas.

### 3.4. Aspectos de construção dos dispositivos conversores

#### 3.4.1. *Escolha dos Materiais*

A escolha dos materiais utilizados e processos de construção, para cada projecto, dependerá de vários factores: cargas a que o equipamento será sujeito, tamanho e geometria, orçamento para custos de construção, longevidade pretendida, tempos de produção e resistência à corrosão. Particularmente para este último factor, em que se pretende garantir a sobrevivência de estruturas de aproveitamento de energia do mar, são necessários materiais com propriedades de robustez, tolerância ao dano e resistência a fadigas mecânicas e à corrosão.

### 3.4.2. *Processo de Corrosão*

Quando materiais como ferro ou aço entram em contacto com o oxigénio e a água, dá-se o início do processo de oxidação do ferro ou enferrujamento. Este fenómeno de corrosão é um processo electroquímico que envolve a passagem de correntes em metais. Através de uma reacção anódica são produzidos electrões livres que passam, através do metal, de uma para outra região na superfície do metal (cátodo), onde são consumidos por uma reacção catódica. Assim, a corrosão ocorre apenas no ânodo, mantendo-se o cátodo inalterado. O ânodo e o cátodo num processo de corrosão podem estar localizados tanto em dois metais diferentes que se encontram ligados entre si, como podem estar localizados na mesma superfície de metal, como acontece no enferrujamento do aço.

A corrosão começa por atacar a superfície do metal, degradando-o e formando um composto ferroso acastanhado (óxido de ferro).

A equação química que traduz este processo é a seguinte:



Se existir a presença de sal, como por exemplo na água salgada, a oxidação tende a dar-se mais rapidamente, como resultado das reacções electroquímicas associadas.

Conhecido o processo de oxidação do ferro, existem diversos métodos para evitar o mesmo, de forma a prolongar a vida do metal. Os principais métodos de protecção assentam na aplicação de tintas ou outros revestimentos protectores, na modificação dos metais utilizados e na prevenção da reacção de superfície, cuja aplicação em sistemas conversores de energia das ondas, resultará na extensão da longevidade dos equipamentos dos mesmos.

#### 3.4.2.1. *Revestimentos de Protecção*

A formação de ferrugem pode ser controlada através da aplicação de alguns revestimentos protectores, tais como tintas que contêm inibidores de ferrugem e que isolam o ferro do meio envolvente. Em ambientes mais hostis, como é o caso da água salgada do mar, são utilizados outros tipos de revestimentos adicionais à base da aplicação de metais, que

podem ser utilizados para uma protecção mais eficaz. Este processo é denominado por galvanização e consiste, normalmente, no revestimento do aço ou do ferro com camadas de zinco [10]. Para além de formar uma barreira física contra o meio envolvente actua, ainda, como ânodo de sacrifício, caso esta barreira seja quebrada. Quando exposto à atmosfera, o zinco reage com o oxigénio e com a água para formar hidróxido de zinco, realizando assim uma protecção catódica do material envolvente. O hidróxido de zinco, por sua vez, ao reagir com o dióxido de carbono da atmosfera, forma uma camada cinzenta, impermeável e insolúvel de carbonato de zinco que adere extremamente bem à camada de zinco imediatamente subjacente, protegendo-a de uma corrosão mais extensa.

#### 3.4.2.2. Protecção Catódica

O princípio da protecção catódica baseia-se na ligação de um ânodo externo ao metal que se pretende proteger (neste caso o aço), promovendo a passagem de corrente contínua de forma a que todas as regiões da superfície do metal se tornem catódicas e, dessa forma, não sejam alvos de corrosão. O ânodo externo pode ser um ânodo galvânico, onde a corrente é resultado da diferença de potencial entre os dois metais, ou pode ser um ânodo de corrente impressa, onde a corrente é fornecida através de uma fonte de corrente contínua.

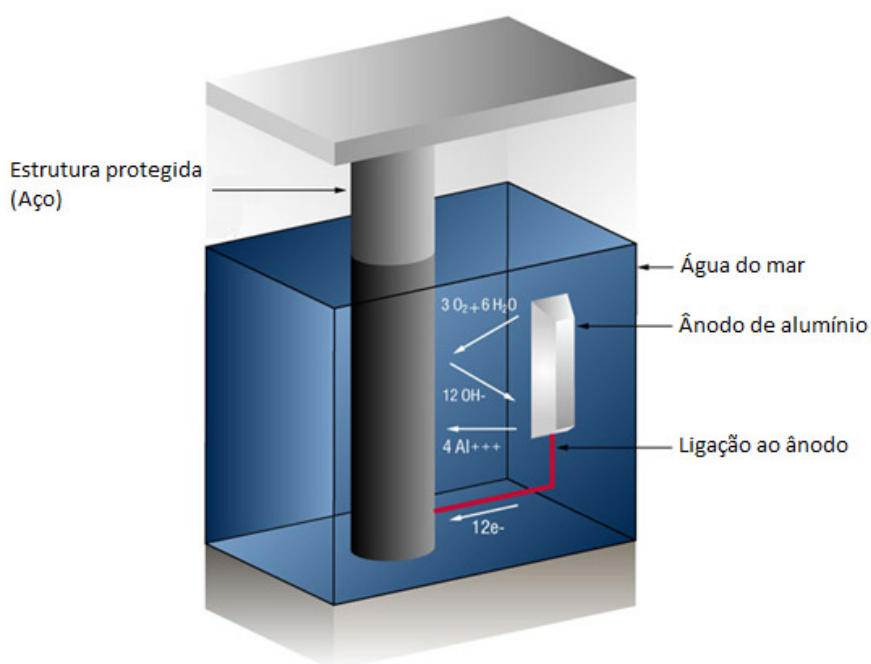


Figura 3.13 — Sistema de protecção catódica (ânodo de sacrifício) [11].

Sistemas de ânodos galvânicos utilizam metais reactivos como ânodos auxiliares ligados electricamente ao aço que se pretende proteger. A diferença de potencial natural entre o ânodo e o aço, tal como se encontra indicado na série electroquímica pelas posições relativas de cada um dos metais, cria a circulação de uma corrente eléctrica no electrólito, no sentido do ânodo para o aço. Assim, toda a superfície do aço torna-se negativamente carregada, formando o cátodo. O alumínio, o zinco e o magnésio são os metais que mais usualmente são utilizados como ânodos de sacrificio.

Os sistemas de corrente impressa utilizam ânodos inertes e usam uma fonte externa de corrente eléctrica contínua para estabelecer uma corrente entre o ânodo e a superfície catódica do metal.

### 3.4.3. *Crescimento Marinho*

Os organismos vivos que habitam os oceanos tendem, naturalmente, a procurar superfícies que sirvam de pontos de ancoragem e refúgio, de forma a poderem alimentar-se facilmente e não andarem à deriva pelo mar, sujeitos aos mais diversos predadores. Assim, qualquer dispositivo que seja colocado no mar e que forneça superfícies de contacto com estas características, tenderá a ficar rapidamente coberto por organismos marinhos, quer sejam plantas ou animais. Um conversor de energia das ondas não será excepção, pelo que para além de o seu peso ir aumentar consideravelmente, quaisquer entradas de água ou sistemas mecanicamente articulados sofrerão, eventualmente, deste problema, conduzindo a perdas de rendimento e aumentos de atrito e temperatura interna do sistema.

De forma a minimizar o impacto do crescimento marinho, podem ser utilizadas diversas técnicas especializadas para este efeito, que assentam na aplicação de certos tipos de revestimentos, na utilização de produtos biocidas e, ainda, na implementação de tratamentos à base de calor ou corrente eléctrica.

A prevenção do crescimento marinho, apesar de se revelar eficaz, implica uma manutenção regular necessária, tornando o crescimento marinho numa fonte de despesas significativa.

#### **3.4.3.1. Tintas e Revestimentos Protectores**

A utilização de revestimentos protectores consiste, muito provavelmente, no método mais eficiente em termos de custos para a prevenção do crescimento marinho. Estes materiais assentam em misturas à base de resinas, pigmentos, sais metálicos e compostos inertes. Visto serem materiais baratos de fabrico fácil, rápido e de durabilidade razoável, constituem um dos métodos preferenciais para a prevenção do crescimento marinho, sendo os revestimentos à base de óxido de cobre os preferencialmente utilizados. No entanto, tal como a maioria dos tipos de revestimentos protectores, apresentam vida limitada, difícil aplicação em superfícies submersas ou molhadas e relativa toxicidade dos agentes utilizados.

#### **3.4.3.2. Produtos biocidas injectáveis**

Os sistemas de fluxo de água fornecem um ambiente bastante favorável para a disposição de organismos já que, através destes canais, existe uma renovação de nutrientes e oxigénio com a circulação de água. Estas áreas são, normalmente, de difícil acesso onde a utilização de revestimentos protectores não é eficaz e que requerem outro tipo de técnicas de prevenção de crescimento marinho. Uma destas técnicas assenta na utilização de produtos biocidas injectáveis, com propriedades biostáticas, em locais que, dada a sua geometria, apresentam restrições no seu acesso, como é o caso de canos, sistemas de dissipação de calor, ou outras áreas ligadas à passagem de um fluxo de água. O cloro, utilizado pela primeira vez em 1800 como desinfetante, tem sido largamente utilizado nesta área e é o produto biocida mais comum para a prevenção de crescimento marinho.

#### **3.4.3.3. Tratamento de Calor**

O tratamento à base de calor é considerado como uma alternativa viável aos métodos anteriores e que tem vindo a ser praticada em diferentes países. Os organismos marinhos são significativamente mais sensíveis a alterações de temperatura do que os restantes organismos

terrestres. Águas quentes, com temperaturas acima dos 50°C, não permitem a sobrevivência da maioria dos organismos marinhos, pelo que a utilização de água quente em sistemas de fluxo de água foi considerada uma técnica eficaz para a prevenção localizada de crescimento marinho.

#### **3.4.3.4. Tecnologia de impulsos eléctricos**

A tecnologia de impulsos eléctricos curtos mas de potência elevada tem sido alvo de um enorme desenvolvimento na última década. Actualmente é possível encontrar dispositivos capazes de gerar impulsos eléctricos de duração extremamente curta e de potência bastante elevada. Estudos experimentais comprovam que esta tecnologia é eficaz na prevenção de crescimento marinho [12].

### **3.5. Considerações Ambientais**

De uma forma geral o aproveitamento de energia das ondas é feito de uma forma relativamente benigna do ponto de vista ambiental. Para os sistemas costeiros o impacto é essencialmente visual. Já nos sistemas *offshore* a localização do equipamento poderá interferir com a navegação e a pesca. No caso de explorações *offshore* em larga escala, dada a forte extracção de energia sobre uma área reduzida, poderá dar-se uma alteração do regime de agitação marítima que atinge a costa, criando-se uma zona de "sombra" e modificando o transporte normal de sedimentos. Ao nível da vida marinha o impacto será pouco significativo, podendo vir apenas a existir algum ruído proveniente dos mecanismos colectores, que pode ser atenuado recorrendo a técnicas convencionais [13].

## Geradores Eléctricos

### 4.1. Introdução

Um gerador eléctrico é um dispositivo que permite converter energia mecânica em energia eléctrica. O sistema assenta na utilização de um colector que, ao ser acoplado ao gerador eléctrico, irá accioná-lo gerando energia eléctrica. Existem diversos tipos de colectores, cada um deles adaptado à origem e tipo de energia que se pretende converter.

No âmbito deste projecto pretende-se utilizar um gerador eléctrico rotativo, para converter energia mecânica de baixa frequência, proveniente do movimento das ondas do mar, em energia eléctrica. Assim, fará sentido analisar várias topologias de geradores eléctricos rotativos, seleccionando o que melhor se adequa aos objectivos delineados, de acordo com o seu rendimento e características de funcionamento. O gerador seleccionado será dimensionado de forma a maximizar a conversão da energia mecânica, captada pelo colector, em energia eléctrica.

### 4.2. Topologias Convencionais

Alguns tipos de máquinas eléctricas, denominados de convencionais, já são bastante conhecidos e utilizados regularmente na produção de energia eléctrica. Topologias como a máquina síncrona e a máquina assíncrona, ou de indução, foram já alvo de inúmeros estudos.

De seguida é feita uma breve descrição de cada uma destas topologias.

#### 4.2.1. *Máquina Síncrona Convencional*

A máquina síncrona convencional adopta vários tamanhos e formas, desde o mini-motor síncrono de magnetos permanentes em relógios de parede, até aos maiores geradores accionados por turbinas a vapor com potências que chegam aos 1500 MVA. Esta máquina é utilizada sobretudo como gerador em centrais termoeléctricas e hidroeléctricas. A denominação de síncrona deve-se ao facto desta máquina operar com uma velocidade de rotação constante, sincronizada com a frequência da tensão eléctrica alternada aplicada aos terminais da mesma, também denominada por velocidade de sincronismo.

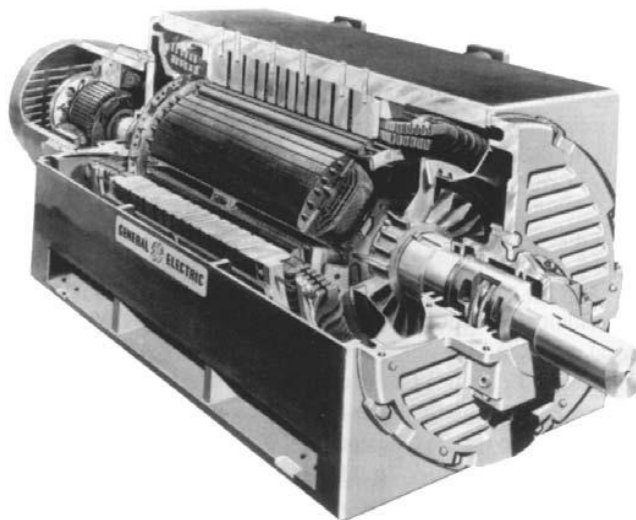


Figura 4.1 — *Máquina síncrona convencional* [14].

Apesar da manipulação da corrente de excitação permitir um controlo relativo sobre a tensão de saída do gerador, a necessidade de existir contacto físico entre o rotor e a fonte de tensão de excitação, resulta num desgaste de componentes que exige uma manutenção regular e dispendiosa das escovas da máquina. Como alternativa a este método de excitação, o enrolamento do rotor pode ser substituído por magnetos permanentes. Esta configuração alternativa traduz-se numa redução do tamanho da máquina e na eliminação de pontos de falha que requerem manutenção, resultando numa topologia com custo total bastante superior e sem possibilidade de se regular a tensão de saída, através de uma fonte de excitação.

Na topologia convencional da máquina síncrona o rotor pode apresentar-se sob duas formas possíveis, originando duas famílias de máquinas: máquinas de rotor cilíndrico, ditas turbo-alternadores ou turbo-motores, em que o enrolamento rotórico é distribuído; e máquinas de pólos salientes, em que o enrolamento é constituído por bobinas concentradas em torno das cabeças polares.



As máquinas de rotor cilíndrico não costumam ter mais que 4 pólos e são projectadas para rodarem a elevadas velocidades encontrando-se, normalmente, associadas a turbinas de vapor ou combustão. Já a maioria das máquinas de pólos salientes tem 6 ou mais pólos. Este tipo de construção é característica dos geradores hidroeléctricos, já que as turbinas hidráulicas operam a velocidades relativamente baixas, pelo que é necessário um elevado número de pólos para produzir a frequência desejada. No entanto, a necessidade de uma rápida variação de fluxo para baixas rotações, traduz-se num passo polar curto. Tal requisito limitará as dimensões do enrolamento de excitação, dado existir uma competição por espaço entre este enrolamento e os pólos rotóricos.

#### 4.2.2. *Máquina Assíncrona Convencional*

Um gerador assíncrono convencional, ou de indução, é um gerador que, ao contrário do gerador síncrono, opera sem necessitar de uma fonte de corrente para o enrolamento de campo. Será por indução electromagnética, a partir da corrente que circula no enrolamento do induzido, que se irão gerar correntes no enrolamento do rotor.

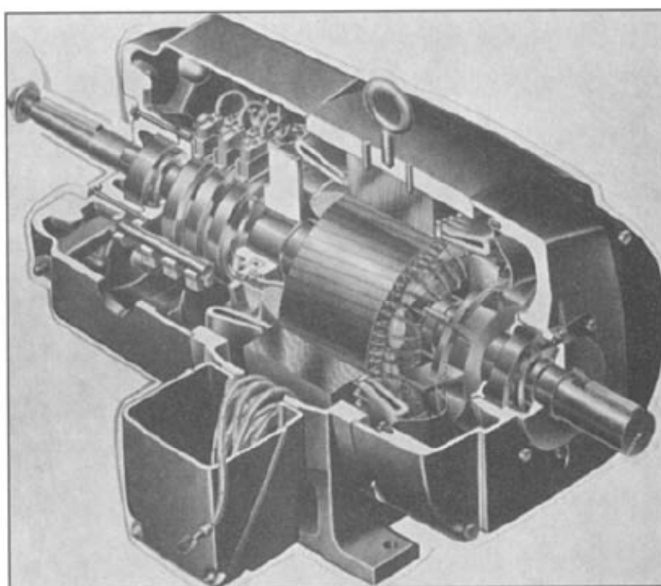


Figura 4.2 — *Máquina assíncrona convencional* [14].

Este comportamento pode ser alcançado utilizando enrolamentos normais, ou seja, um rotor bobinado, ou utilizando uma estrutura bastante mais simples, de barras paralelas ao veio, feitas em metal condutor, ligadas com anéis nas extremidades, conhecida como gaiola de esquilo.

Apesar do motor de indução ser o mais comum dos motores eléctricos, quando usado como gerador apresenta, comparativamente, um fraco rendimento para a maioria das aplicações, principalmente, em baixas rotações. No caso em estudo, este tipo de gerador oferece a vantagem de conseguir absorver prontamente possíveis flutuações erráticas da potência mecânica fornecida pela fonte de energia das ondas. Também apresenta a vantagem de ser uma máquina bastante menos dispendiosa quando comparada com a máquina síncrona.

### 4.3. Máquina de Fluxo Axial de Magnetos Permanentes (*AFPM*)

Ao contrário das topologias de fluxo radial descritas anteriormente, a máquina de Fluxo Axial de Magnetos Permanentes (*Axial Flux Permanent Magnet*) tem a superfície de entreferro perpendicular ao eixo de rotação, com a trajectória do fluxo magnético paralela ao mesmo eixo.

Graças à sua forma achatada, construção compacta e elevada densidade de potência [15], a máquina de Fluxo Axial de Magnetos Permanentes é uma alternativa atractiva às topologias convencionais de fluxo radial. Existem várias configurações possíveis, consoante o posicionamento do estator, do rotor e dos enrolamentos.

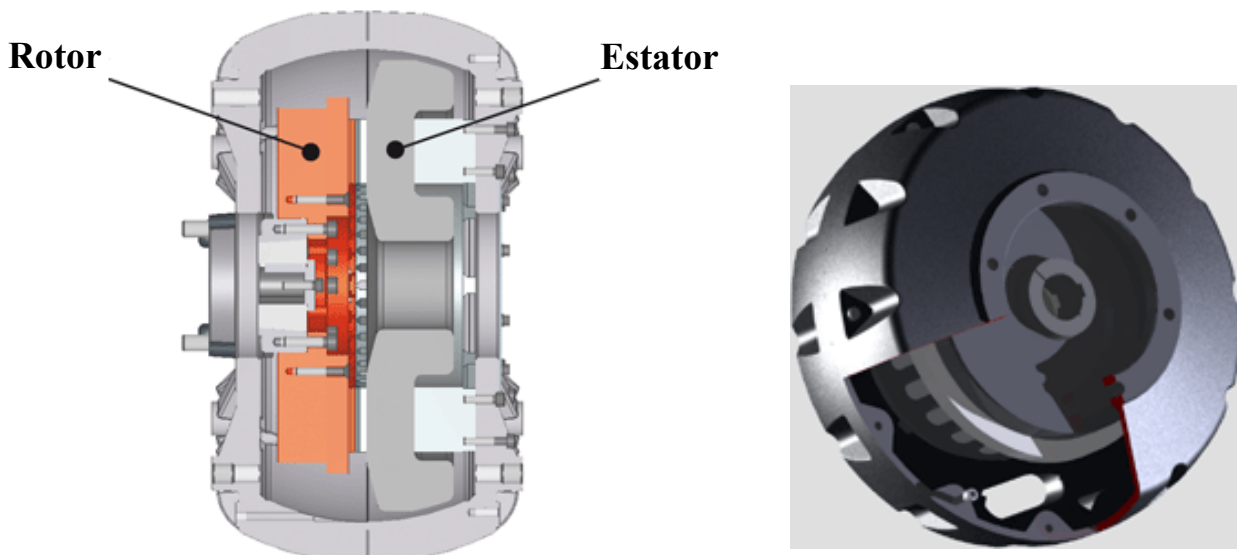


Figura 4.3 — Exemplo de máquina de fluxo axial [16].

Este tipo de máquina pode operar como gerador de pequena ou média potência. A sua topologia permite acomodar uma elevada quantidade de pólos, tornando-se ideal para aplicações de baixa velocidade.

O perfil único desta máquina permite gerar diversas subtopologias, que podem ser desenhadas com apenas um entreferro ou múltiplos e com ou sem cavas no estator. As máquinas de fluxo axial de baixa potência são desenhadas, frequentemente, sem cavas e com magnetos permanentes de superfície. À medida que a potência de saída da máquina aumenta, a superfície de contacto entre o rotor e o veio, em relação à potência gerada, torna-se mais reduzida. Esta é uma característica que resulta, habitualmente, em avarias neste tipo de topologia [15].

#### **4.4. Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes (TFPM)**

Actualmente tem aumentado rapidamente a necessidade de obter maior potência a partir de máquinas eléctricas com tamanhos e pesos cada vez menores. Por outras palavras, cada vez mais se tem atenção ao binário específico de saída, ou seja, à quantidade de binário por unidade de volume da máquina. Tanto em aplicações em modo de motor, como em modo de gerador, a máquina eléctrica trará sempre mais valias, se for possível reduzir o seu peso e a sua dimensão, garantindo que se mantém a potência necessária à saída.

A introdução de novos magnetos permanentes no mercado, com densidades de fluxo remanescente cada vez mais elevadas, tem aumentado a potência específica de saída das máquinas eléctricas. Mas como tanto os dentes da máquina, como os condutores do induzido, competem pelo mesmo espaço, não é possível tirar o máximo partido destes novos materiais quando utilizados em máquinas eléctricas de topologia convencional.

As restrições existentes nas máquinas eléctricas convencionais e a necessidade de aumentar a potência específica de saída conduziram ao desenvolvimento de um novo conceito de máquinas denominado por topologia de fluxo transversal.

A Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes (*Transverse Flux Permanent Magnet*) é também considerada uma máquina síncrona, já que opera à velocidade

de sincronismo. A sua construção é, no entanto, bastante diferente da máquina síncrona convencional.

#### 4.4.1. *Conceito de Fluxo Transversal*

No caso das máquinas rotativas as linhas de fluxo deverão estar orientadas radial ou axialmente, de forma a serem perpendiculares à direcção do movimento de rotação. A direcção dos condutores será, então, axial ou radial respectivamente, de forma a produzir uma força na direcção tangencial. Ao contrário das máquinas de fluxo radial convencional ou axial, as linhas de fluxo na máquina de fluxo transversal, tal como o nome indica, residem num plano transversal ou perpendicular, à direcção do movimento de rotação e à direcção que toma a corrente.

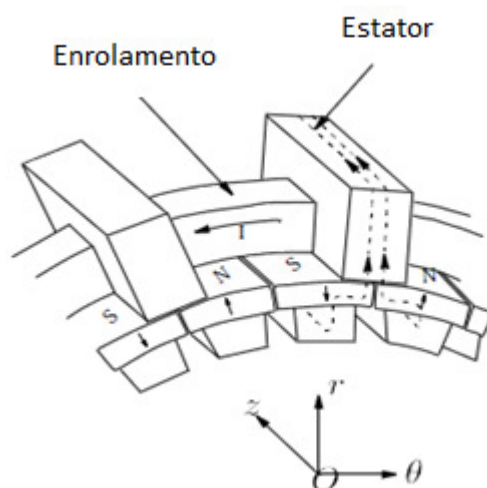


Figura 4.4 — *Topologia de fluxo transversal* [17].

Uma das vantagens de maior destaque no uso desta topologia é a possibilidade de se alcançar uma densidade de binário bastante elevada. Incrementando o número de pólos e, conseqüentemente, reduzindo o passo polar, para determinadas dimensões da máquina e corrente de carga, é possível elevar a potência da máquina, traduzindo-se num aumento da densidade de binário específico [17]. Esta topologia revela-se ideal para sistemas que funcionem a baixas rotações. Porém, o passo polar não pode ter uma espessura infinitamente reduzida. Para além de poder pôr em causa a rigidez mecânica da máquina, a quantidade de fluxo magnético de dispersão produzida na direcção axial está relacionada, em grande parte, com a dimensão do passo polar.

Outra característica atractiva na máquina de fluxo transversal é o facto de permitir que a densidade de corrente eléctrica e a densidade de fluxo magnético sejam dimensionados independentemente [17] [18] [19] [20], ao contrário do que sucede na topologia radial convencional, em que a área da secção do entreferro compete, directamente, pelo espaço disponível para o enrolamento. Na topologia de fluxo transversal, a área da secção do entreferro define a densidade de corrente, enquanto que o comprimento axial define a densidade de fluxo magnético.

A principal desvantagem da *TFPM* é o seu elevado fluxo de dispersão, que resulta num baixo factor de potência [17] [20]. Este valor pode ser melhorado, dentro de um certo limite, aumentando a secção dos pólos, perdendo, desta forma, a densidade de binário. Assim, no processo de desenho da máquina deverá ser considerado este *trade-off* entre o rendimento da máquina e a utilização dos materiais activos, tentando encontrar a melhor solução.

#### 4.5. Comparação entre as diversas topologias

Nas tabelas que se seguem [21] são feitos estudos de comparação sobre as densidades de binário e o custo aproximado para duas classes de diâmetro de máquinas. Do estudo destacam-se as seguintes topologias:

- Máquina de Fluxo Axial com Magnetos Permanentes Interiores (*Axial Flux machine with Interior Permanent Magnets – AFPM*);
- Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes de estator simples configurada com magnetos de superfície (*Transverse Flux Permanent Magnet Single Stator machine with Surface Mounted magnets – TFPM SSSM*);
- Máquina de Fluxo Radial de Magnetos Permanentes configurada com magnetos de superfície (*Radial Flux Permanent Magnet machine – RFPM*);
- Máquina de Fluxo Axial de Magnetos Permanentes com estator simples e rotor duplo (*AFPM Torus*);
- Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes com estator duplo configurada com concentradores de fluxo (*Transverse Flux Permanent Magnet Double Stator machine with Flux Concentrators – TFPM DSFC*).

Topologia	Diâmetro (m)	Densidade de Binário (kNm/m <sup>3</sup> )	Custo/Binário aproximado (Euro/kNm)
<i>AFIPM</i>	0,17	26,1	1663
<i>TFPM SSSM</i>	0,17	28,9	1360
<i>RFPM</i> com magnetos de superfície	0,16	11,5	4021
<i>AFPM Torus</i>	0,21	12,4	4777

Tabela 4.1 — Comparação entre várias topologias de diâmetro equivalente (classe de diâmetros menores) [21].

Topologia	Diâmetro (m)	Densidade de Binário (kNm/m <sup>3</sup> )	Custo/Binário aproximado (Euro/kNm)
<i>TVIHRM</i>	0,40	9,1	1565
<i>AFPM Torus</i>	0,40	34,3	2063
<i>TFPM DSFC</i>	0,36	50,9	566

Tabela 4.2— Comparação entre várias topologias de diâmetro equivalente (classe de diâmetros maiores) [21].

Observando as tabelas 4.1 e 4.2 verifica-se que, para ambas as classes de diâmetro, a Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes apresenta claras vantagens em relação ao uso de geradores convencionais e axiais. Quando comparada com estes, a máquina de fluxo transversal apresenta, claramente, um melhor aproveitamento do tamanho e do material activo na criação de fluxo magnético. Este trabalho irá, assim, debruçar-se sobre esta topologia.

Existem diversas subtopologias para a *TFPM*. Nos capítulos que se seguem são analisadas algumas das topologias mais comuns.

#### 4.5.1. *Topologia de Estator Duplo e Enrolamento Duplo*

A Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes, com Estator Duplo e Enrolamento Duplo, encontra-se representada na figura 4.5. O estator desta máquina é constituído por duas séries de pólos em ‘U’ feitos de aço laminado, que rodeiam dois enrolamentos, um em cada lado do rotor. O rotor é formado por concentradores de fluxo e magnetos permanentes. Os magnetos encontram-se magnetizados paralelamente à direcção do movimento, com polaridades alternadas.

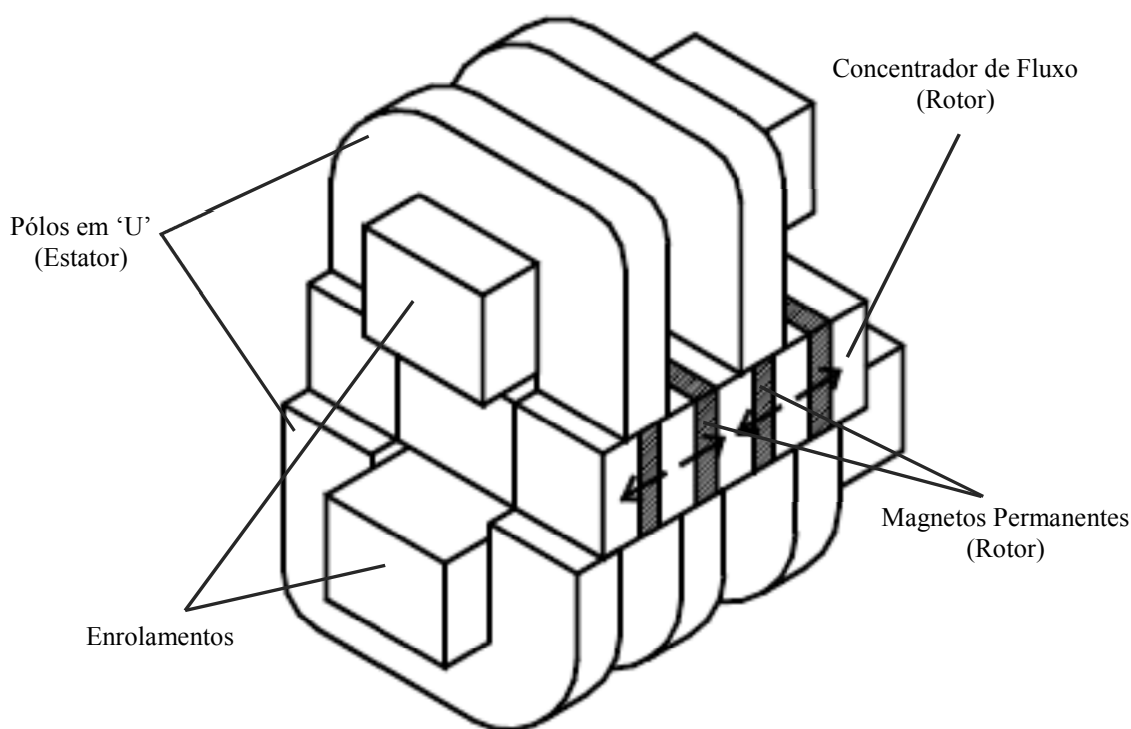


Figura 4.5 — *TFPM de Estator Duplo e Enrolamento Duplo* [17].

Esta configuração é bastante atractiva do ponto de vista electromagnético, dado que cada pólo rodeia um enrolamento ao mesmo tempo que fecha o circuito magnético com o pólo do lado oposto do rotor. Este tipo de construção revela algumas fragilidades, principalmente no núcleo estatórico exterior.

#### 4.5.2. Topologia de Estator Duplo e Enrolamento Simples

A Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes, com Estator Duplo e Enrolamento Simples, que se encontra representada na figura 4.6, tem uma configuração bastante idêntica à topologia anterior, apresentando o mesmo tipo de comportamento electromagnético. Difere, no entanto, quanto ao número de enrolamentos presentes no estator, tendo apenas um enrolamento a ser cruzado pelo fluxo magnético que circula pelos pólos do estator. A supressão de um dos enrolamentos resultará numa diminuição da tensão em vazio para metade do valor da tensão gerada pela topologia anterior. No entanto, a relutância do circuito magnético permanece a mesma, quer sejam utilizados um ou dois enrolamentos. Assim, no caso de se utilizar apenas um enrolamento, a saturação dos pólos do estator será atingida com o dobro do valor de corrente que produziria o mesmo efeito no caso da topologia de enrolamento duplo.

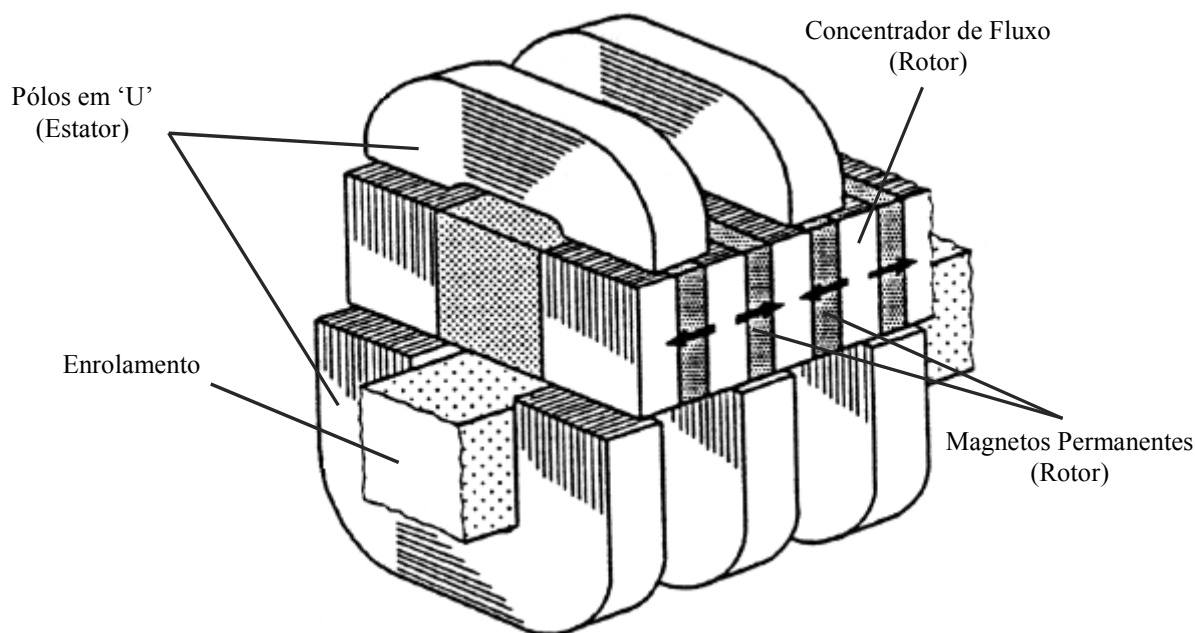


Figura 4.6 — TFPM de Estator Duplo e Enrolamento Simples [17].



Na realidade, caso seja utilizada a mesma quantidade de cobre que na topologia de duplo enrolamento, ou seja, quando o enrolamento simples tiver o dobro do número de espiras de um dos enrolamentos duplos, alongando os pólos em 'U' de um dos lados do estator, e caso sejam encurtados os pólos do lado em que foi suprimido o enrolamento, ter-se-á o mesmo valor de binário e de rendimento para ambas as topologias. Esta topologia terá a vantagem de ter dimensões mais reduzidas e uma construção mais simples.

#### 4.5.3. *Topologia de Estator Duplo em 'C' e Enrolamento Simples*

A Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes, com Estator Duplo em 'C' e Enrolamento Simples, encontra-se representada na figura 4.7. Esta topologia acaba por ser uma modificação da topologia de estator duplo e enrolamento simples com pólos em 'U'. Os pólos do estator foram encurtados e agregados numa única peça e foi, ainda, substituída uma das filas do rotor por aço.

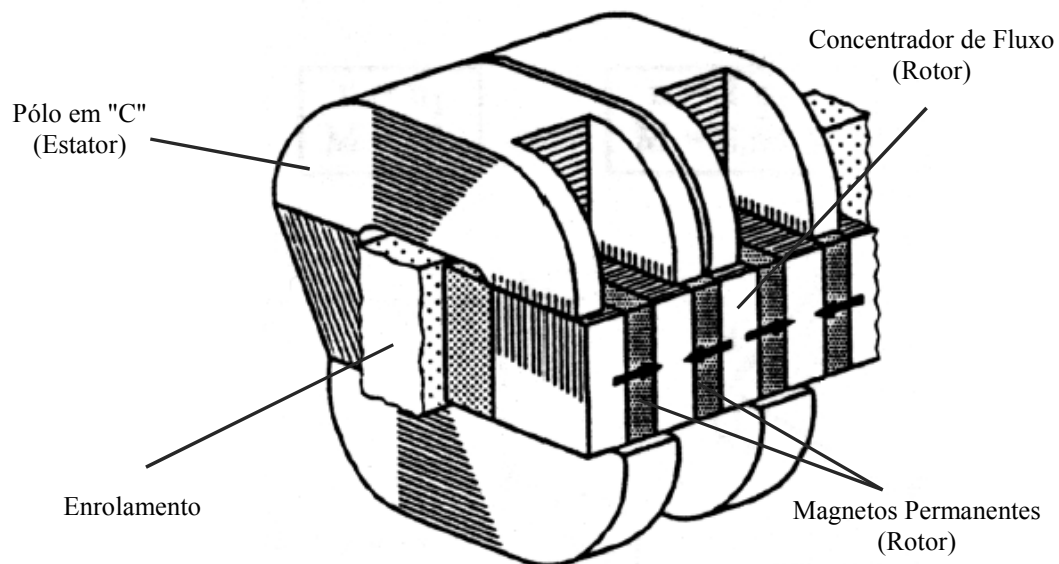


Figura 4.7 — *TFPM de Estator Duplo em 'C' e Enrolamento Simples* [17].

Do ponto de vista electromagnético, este tipo de configuração usa a concentração de fluxo da mesma forma que usaria com duas filas de magnetos permanentes. A grande diferença centra-se na remoção de uma das filas de magnetos permanentes e concentradores de fluxo e, ainda, de dois entreferros. Existirá, assim, uma redução na relutância do circuito magnético. Esta estrutura apresenta uma forte robustez mecânica, sendo indicada para funcionar como motor em aplicações que exijam um elevado binário de saída.

#### 4.5.4. *Topologia de Pólos em Garra*

A Máquina de Fluxo Transversal, configuração de Pólos em Garra, encontra-se representada na figura 4.8.

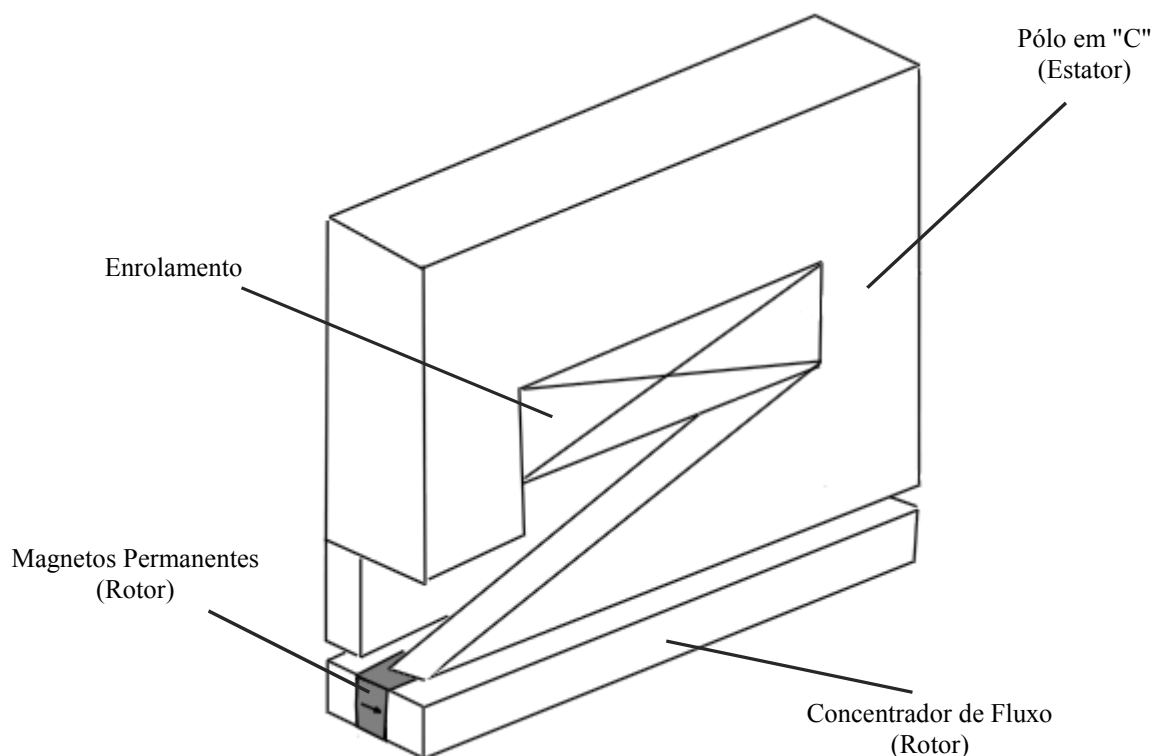


Figura 4.8 — *TFPM com Pólos em Garra*[17].

Esta configuração assemelha-se à topologia da *TFPM* de Estator Duplo em "C" e Enrolamento Simples, diferindo principalmente na forma dos pólos do estator. Apesar de proporcionar um melhor aproveitamento do espaço do estator, esta configuração resulta num elevado fluxo de dispersão, limitando o rendimento da máquina.

Tendo em conta os objectivos deste projecto, dimensionar um gerador de baixa rotação para aproveitamento da energia das ondas, a selecção da máquina para o efeito deverá passar por uma topologia otimizada para estas características. Atendendo às suas vantagens, face a outras máquinas convencionais, será dimensionada uma *TFPM* com topologia de estator duplo e enrolamento simples, utilizando a configuração de concentradores de fluxo.

## **4.6. Estrutura Multifásica**

A máquina de fluxo transversal tem uma estrutura de base monofásica, estável e rígida [22] [23]. Assim, e tendo em conta a topologia seleccionada de estator duplo e enrolamento simples, uma forma simples e eficaz para se obter uma estrutura multifásica será agregar, paralelamente, várias estruturas monofásicas, com um desfasamento dos rotores de cada fase [23]. Este tipo de estrutura tem a vantagem de ser de análise e construção bastante simples, com fluxo magnético de dispersão reduzido.

## **4.7. Magnetos Permanentes**

Tal como foi dito anteriormente, é possível criar um campo magnético de excitação, injectando uma corrente num enrolamento de material condutor. Para além deste método, existe ainda a possibilidade de serem utilizadas estruturas de material magneticamente activo para criar este mesmo campo de excitação, denominadas de magnetos permanentes.

Os magnetos permanentes podem ser colocados no rotor da máquina de diversas formas. Existem duas configurações que são, habitualmente, utilizadas: configuração com magnetos embutidos e configuração com magnetos à superfície. Na configuração com magnetos embutidos, estes encontram-se polarizados na direcção circunferencial, intercalados por concentradores de fluxo. Estes concentradores de fluxo permitem um maior controlo sobre a densidade de fluxo no entreferro, sendo possível serem atingidos elevados valores de  $B_g$ , mesmo com baixos valores de densidade de fluxo remanescente  $B_r$ . Visto que a densidade de fluxo magnético no entreferro não tem que ser, forçosamente, a densidade de fluxo do magneto, o ponto de funcionamento do circuito magnético pode ser dimensionado de forma a coincidir com o produto energético máximo do magneto permanente.

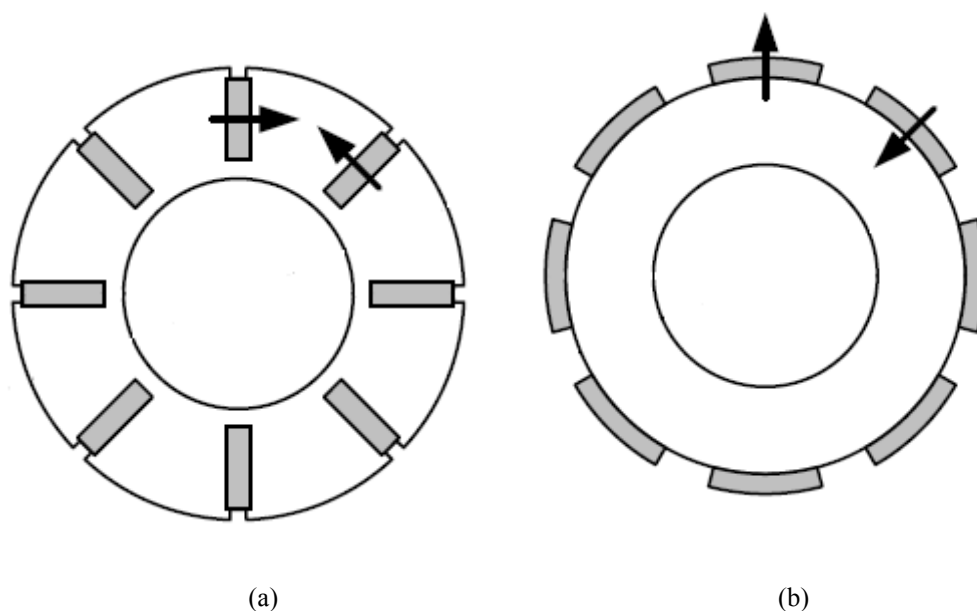


Figura 4.9 — (a) Rotor com magnetos permanentes embutidos [23]. (b) Rotor com magnetos permanentes de superfície [23].

Na configuração com magnetos à superfície, estes encontram-se polarizados radialmente ou, por vezes, circunferencialmente. A construção deste tipo de rotor é relativamente simples, comparativamente com a configuração anterior. Contudo, esta configuração, para além de ser susceptível a um maior fluxo de dispersão resultante da

disposição dos magnetos face ao curto passo polar, também não permite o controlo do dimensionamento dos magnetos permanentes para que operem no ponto de funcionamento de produto energético máximo.

Para este tipo de aplicações, é fundamental que o material magnético utilizado apresente um produto energético elevado, ou seja,  $(B_m \cdot H_m)_{\max}$ . Com as referidas características, de entre as famílias de magnetos permanentes, destaca-se a dos magnetos terras raras, onde se incluem os magnetos de Neodímio e os de Samário-Cobalto.

#### **4.7.1. *Magneto de Neodímio-Ferro-Boro***

O magneto de Neodímio (NdFeB), constituído por materiais como o Neodímio, Ferro e Boro, é caracterizado por um elevado produto energético (até 400 kJ/m<sup>3</sup>) e por um elevado campo coercivo (até 1 kA/m) [24], sendo o seu preço relativamente acessível. Com uma fraca resistência à corrosão, este tipo de magneto é, normalmente, revestido por uma camada de níquel ou *epoxy*. Os magnetos de Neodímio funcionam até temperaturas máximas de 200°C [24]. Os magnetos eficientes em temperaturas superiores a 120°C terão um preço superior.

#### **4.7.2. *Magneto de Samário-Cobalto***

O Samário-Cobalto (SmCo), outro magneto da família dos terras-raras, é constituído, essencialmente, por Cobalto e Samário e é o magneto permanente mais dispendioso de se fabricar, devido ao custo associado à grande quantidade de Cobalto utilizada e à natureza frágil da liga de Samário. Este magneto permanente oferece uma elevada resistência à corrosão e consegue suportar elevadas temperaturas de funcionamento, até um máximo de 350°C [24]. Os magnetos de Samário-Cobalto são o segundo tipo de magnetos permanentes com maior produto energético máximo (até 240 kJ/m<sup>3</sup>) [24], precedidos pelos magnetos de Neodímio-Ferro-Boro.



## Dimensionamento

### 5.1. Introdução

**N**O capítulo anterior foram abordadas diversas topologias para geradores eléctricos e descritos aspectos técnicos para cada uma delas. Dentro das várias topologias analisadas, foi escolhida aquela que apresentou maiores potencialidades para a aplicação pretendida.

Nos restantes capítulos analisar-se-á a *TFPM* — Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes — com topologia de estator duplo e enrolamento simples, com concentradores de fluxo. Será feita, também, uma abordagem à topologia de enrolamento duplo, apenas a título de comparação.

Como foi dito anteriormente, o objectivo deste trabalho passa por desenvolver um gerador eléctrico rotativo que opere a velocidades de rotação baixas e que permita converter energia mecânica das ondas do mar, em energia eléctrica a ser fornecida à rede eléctrica.

Como se pretende tirar o máximo partido de um gerador que opere a baixas rotações, este deverá ser aplicado de forma directa no sistema de conversão. O uso de uma caixa de velocidades será posto de lado, por ser um equipamento que implica custos adicionais, tanto de aquisição, como de manutenção.

O gerador deverá, então, ser aplicado em conversores que criem um movimento mecânico rotativo, com uma frequência bastante reduzida.

No presente capítulo é feito o dimensionamento de um protótipo monofásico capaz de gerar uma potência de 10 kW, considerando uma velocidade média de rotação de 150 rpm no veio que acciona o gerador. Serão calculados os valores ideais para cada um dos parâmetros de construção da topologia e utilizados esquemas simplificados da máquina para se retirarem as expressões que traduzem o funcionamento do gerador.

## 5.2. Circuito Magnético

A topologia em análise encontra-se representada na figura 5.1. O rotor da máquina é constituído por duas filas de magnetos permanentes e concentradores de fluxo, e por um separador central de aço inoxidável, material que, sendo diamagnético, terá como função isolar magneticamente cada uma das filas do rotor. Nestas filas têm-se magnetos polarizados na direcção do movimento de rotação, sendo que cada par de magnetos se encontra inversamente polarizado e intercalado por um concentrador de fluxo.

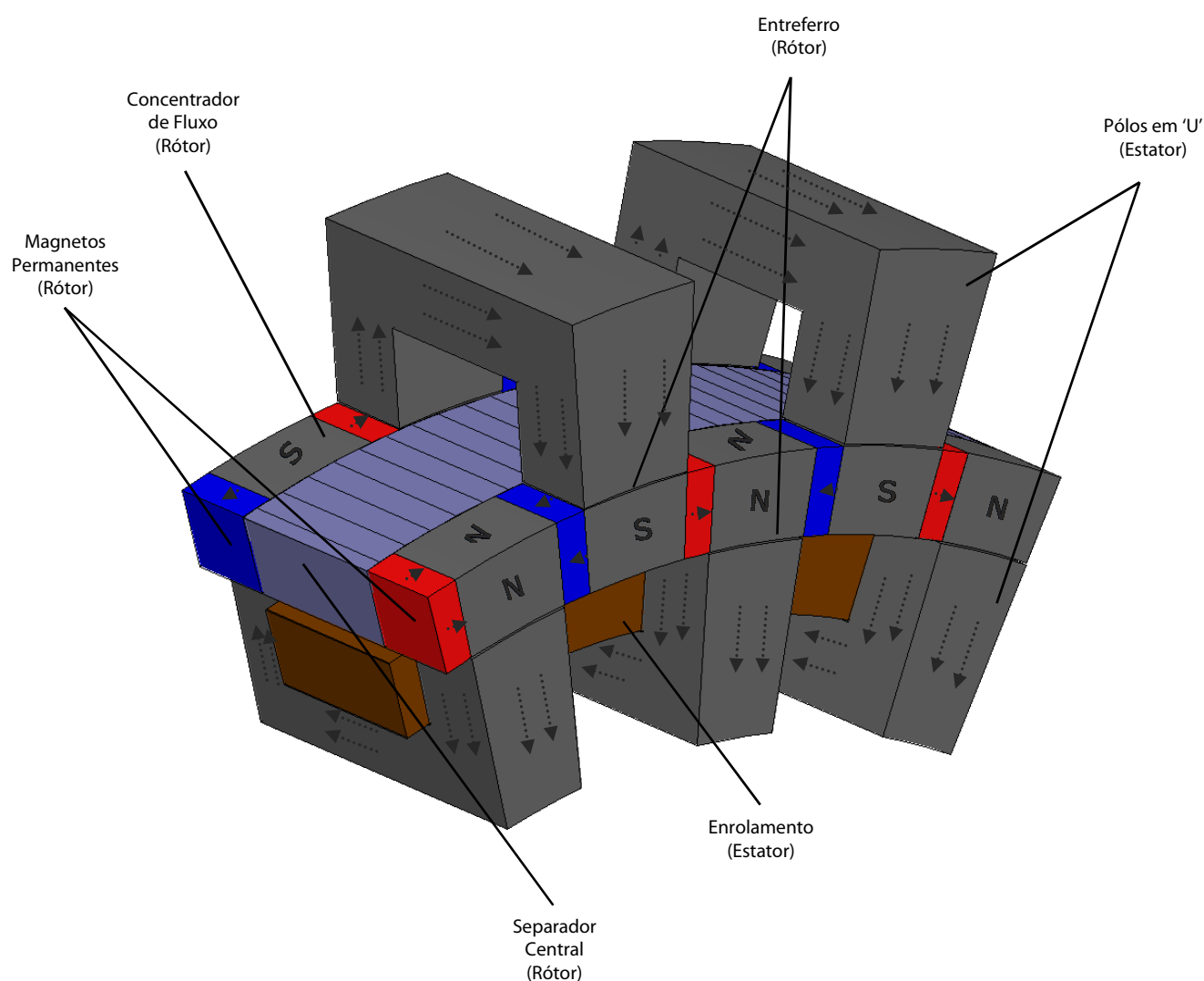


Figura 5.1 — Topologia em análise (TFPM de rotor duplo e enrolamento simples).



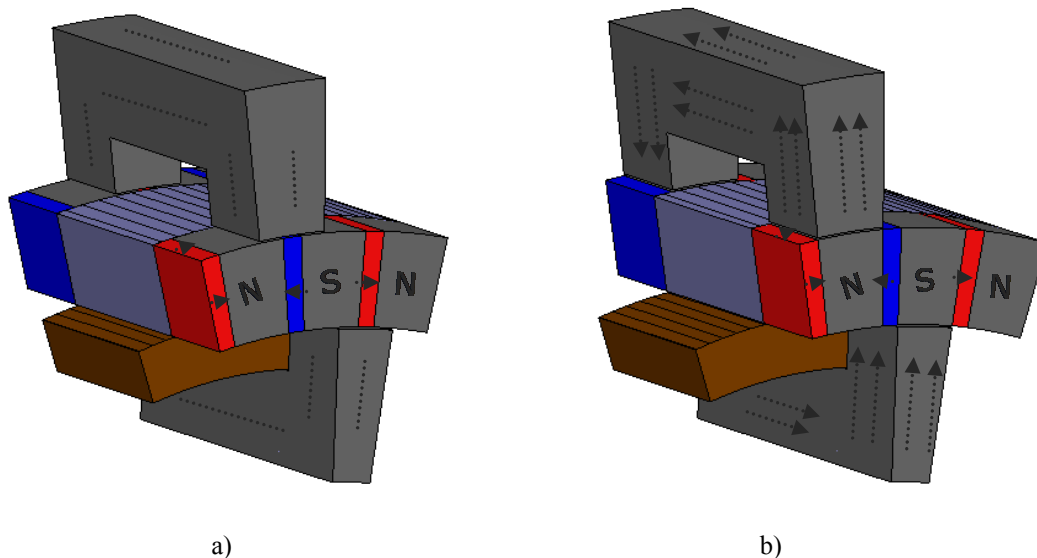


Figura 5.2 — a) Sentido do fluxo magnético após meio passo polar; b) Sentido do fluxo magnético após um passo polar completo.

O concentrador de fluxo deverá ser feito de um material de elevada permeabilidade magnética, de forma a agregar a maior quantidade de fluxo magnético possível, reduzindo a relutância e possível fluxo de dispersão do circuito. No duplo estator encontram-se dispostos pólos em ‘U’, separados do rotor por duas distâncias de entreferro por cada pólo. É, ainda, no estator que se encontra o enrolamento de cobre. Neste tipo de topologia pode ser, também, utilizado um enrolamento duplo. Será feita uma análise inicial com apenas um enrolamento na componente estatórica inferior. O facto de o enrolamento estar disposto desta forma, torna a construção mais simples e reduz a quantidade de cobre utilizada.

Na mesma figura 5.1 é possível observar o trajecto ocupado pelo fluxo magnético. Tomando como ponto de partida um dos pólos do estator superior, após cruzar o entreferro, o fluxo é agregado num concentrador de fluxo. No caso representado, este concentrador de fluxo encontra-se, temporariamente, polarizado na direcção radial e sentido negativo, considerando o eixo de rotação como referencial de origem. De seguida o fluxo toma a direcção do movimento de rotação, atravessando um magneto permanente e voltando a ser agregado noutro concentrador de fluxo, desta vez polarizado em sentido inverso ao concentrador de fluxo anterior. O fluxo atravessa, então, outra distância de entreferro, circula pelo pólo em ‘U’ do estator inferior até atravessar a próxima distância de entreferro e voltar a ser agregado no concentrador de fluxo paralelo ao concentrador de fluxo anterior. A trajectória do fluxo tende, assim, a fechar o circuito magnético atravessando o magneto permanente, concentrador de fluxo e entreferro que se encontram polarizados de forma a dirigir o fluxo para o pólo inicial. De notar que as linhas rotóricas se encontram polarizadas inversamente. Existirá um circuito magnético, como o que foi descrito, por cada par de pólos. Tal como pode ser observado na figura 5.2 a) e b), à medida que o rotor vai girando, os o

fluxo magnético inverte o sentido em cada pólo em ‘U’ e cada uma destas trajectórias de fluxo magnético induzirá uma força electromotriz no enrolamento. A força electromotriz total será proporcional ao número de circuitos magnéticos existentes e, por conseguinte, ao número de pares de pólos.

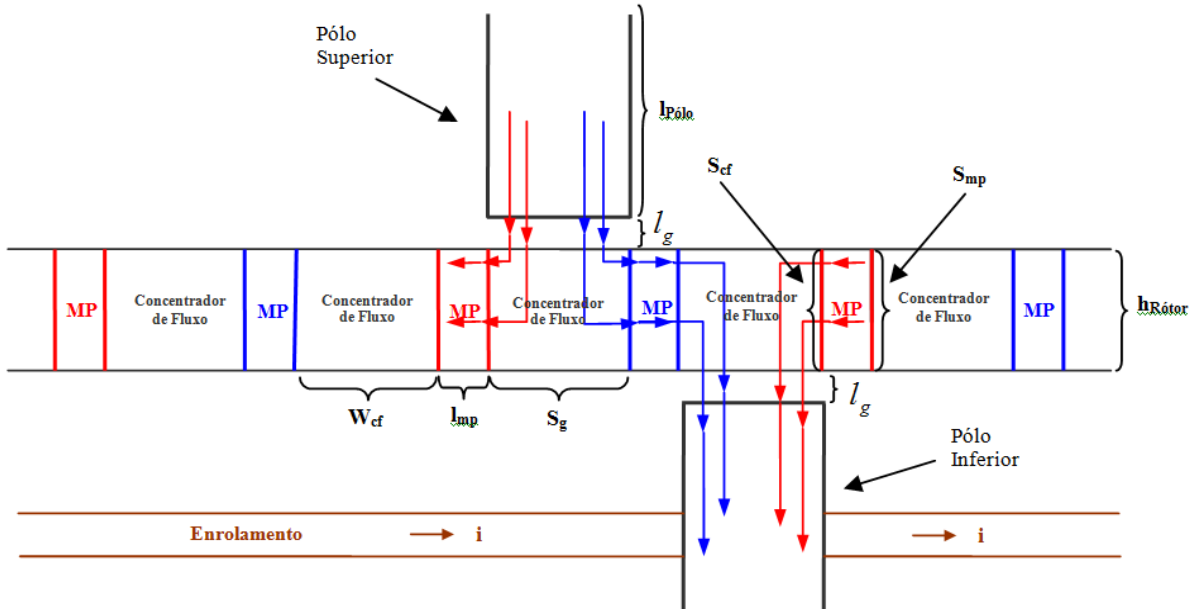


Figura 5.3 — Trajectória tomada pelo fluxo na topologia em estudo.

Na figura 5.3 encontra-se representada parte da trajectória tomada pelo fluxo magnético, assim como os parâmetros da máquina que foram dimensionados. Para facilitar o dimensionamento foram consideradas as seguintes igualdades:

— Relativamente ao comprimento dos pólos do estator, representado por  $l_{\text{pólo}}$ , foi considerado o mesmo valor para os pólos superiores e inferiores:  $l_{\text{pólo}} = l_{\text{pólo superior}} = l_{\text{pólo inferior}}$ ;

— A secção de ambas as linhas de magnetos permanentes e concentradores de fluxo do rotor será quadrada e terá como valor  $S_{\text{rotor}} = h_{\text{rotor}}^2$ ;

— As secções do rotor, dos magnetos permanentes e dos concentradores de fluxo, terão o mesmo valor:  $S_{\text{rotor}} = S_{\text{mp}} = S_{\text{cf}}$ .

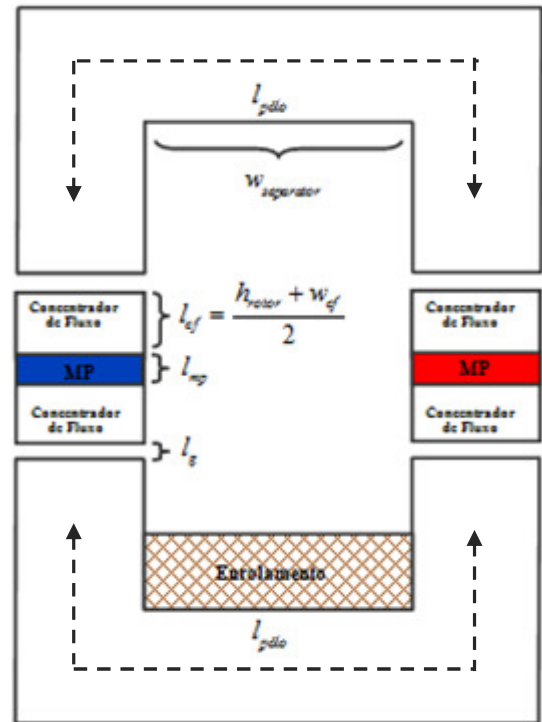


Figura 5.4 — Circuito magnético correspondente à topologia em estudo.

### 5.3. Expressão da Relutância Magnética

Partindo da expressão geral da relutância,  $\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot A}$ , deduz-se a expressão da relutância correspondente ao circuito magnético representado na figura 5.4:

$$\mathfrak{R}_{circ} = 2 \cdot \frac{l_{pólo}}{\mu_0 \cdot \mu_{Fe} \cdot S_{pólo}} + 4 \cdot \frac{l_g}{\mu_0 \cdot S_g} + 2 \cdot \frac{l_{mp}}{\mu_0 \cdot \mu_{mp} \cdot S_{mp}} \quad (5.1)$$

Como  $\mu_{Fe} \gg \mu_0$  e  $\mu_{Fe} \gg \mu_{mp}$ :

$$\mathfrak{R}_{circ} \cong \frac{2}{\mu_0} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{l_g}{S_g} + \frac{l_{mp}}{\mu_{mp} \cdot S_{mp}} \right] \quad (5.2)$$

Visto existirem tantos circuitos magnéticos quantos pares de pólos chega-se à expressão da relutância total da máquina:

$$\mathfrak{R}_{Total} = \frac{2 \cdot P_{pólos}}{\mu_0} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{l_g}{S_g} + \frac{l_{mp}}{\mu_{mp} \cdot S_{mp}} \right] \quad (5.3)$$

### 5.4. Frequência Eléctrica

Foi considerado que a velocidade de rotação mecânica média de um sistema de conversão de aplicação directa ronda as 150 rpm ( $N_{mec} = 150 \text{ rpm}$ ), pelo que a frequência mecânica terá um valor de  $f_{mec} = 2,5 \text{ Hz}$ .

O ângulo de rotação mecânica relaciona-se com o ângulo da f.e.m. induzida — ângulo eléctrico — a partir do número de par de pólos da máquina:

$$\theta = P_{pólos} \cdot \theta_{mec} \quad (5.4)$$

A velocidade angular eléctrica será dada pela expressão:

$$\omega = P_{pólos} \cdot \omega_{mec} \quad (5.5)$$

Pelo que a frequência eléctrica resultante será:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{P_{\text{pólos}} \cdot \omega_{\text{mec}}}{2\pi} \quad (5.6)$$

onde:

$$\omega_{\text{mec}} = \frac{2\pi}{60} \cdot N_{\text{mec}} \quad (5.7)$$

Para que a frequência eléctrica gerada seja o mais próxima possível da frequência da rede (50 Hz) serão utilizados 20 pares de pólos.

## 5.5. Selecção do Magneto Permanente

O material magnético activo seleccionado para o dimensionamento da máquina foi o Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB), devido às suas propriedades magnéticas.

Foram consideradas as seguintes características magnéticas para o material seleccionado:

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
$B_R$	1,4T
$\mu_{mp}$	1,95
$H_C$	795 kA/m

Tabela 5.1 — *Característica do magneto permanente de NdFeB [20].*

De forma a retirar-se o máximo partido do material magnético activo utilizado, o ponto de funcionamento do gerador deverá aproximar-se do ponto de produto energético máximo do material magnético escolhido.

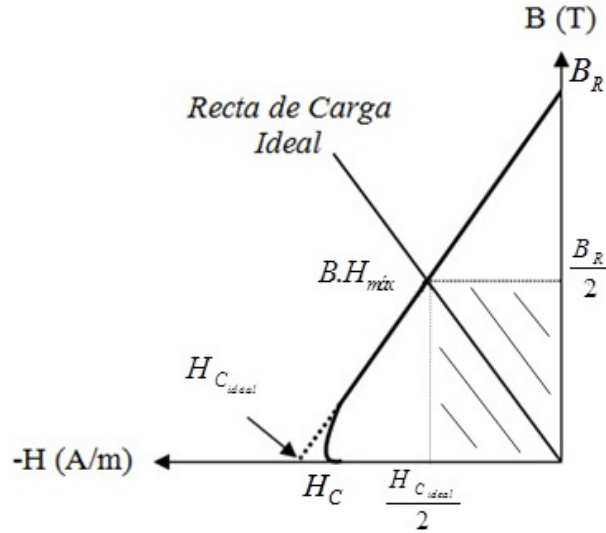


Figura 5.5 — Característica de desmagnetização de um magneto permanente e Recta de carga ideal.

Na figura 5.5 encontra-se representada a característica de desmagnetização de um magneto permanente.

Considerou-se uma curva ideal aproximada à curva de desmagnetização real, de forma a simplificar o cálculo do produto energético máximo  $(B.H)_{máx}$ .

Partindo da expressão da curva ideal:

$$B = \mu_0 \mu_{mp} H + B_R \Leftrightarrow H = \frac{B - B_R}{\mu_0 \mu_{mp}} \quad (5.8)$$

Assim, o valor de  $H_C$  para condições ideais será:

$$H_{C \text{ ideal}} = -\frac{B_R}{\mu_0 \mu_{mp}} \quad (5.9)$$

Analisando a figura 5.5, considerando uma característica de desmagnetização aproximadamente linear, verifica-se que o ponto onde o produto energético é máximo corresponde a  $(x,y) = (H_{C \text{ ideal}}/2; B_R/2)$  e tem-se que:

$$(x,y) = (-530,5 \text{ kA/m}; 0,7 \text{ T}) \quad (5.11)$$

A equação da *Recta de Carga Ideal* deverá, então, ter um declive

$$m = \frac{B_R / 2}{H_{Cideal} / 2} = -\mu_0 \mu_{mp}, \quad (5.12)$$

$$\text{de forma a que } B = m.H + 0 \Rightarrow B = -\mu_0 \mu_{mp}.H \quad (5.13)$$

## 5.6. Cálculo da Recta de Carga

De forma a parameterizar-se a topologia em estudo, é necessário calcular a expressão da recta de carga, correspondente ao circuito magnético descrito na figura 5.4.

A equação de Maxwell que traduz a lei de Ampere ( $\oint_C \vec{H}.d\vec{l} = \int_S \vec{J}.d\vec{S}$ ) permite chegar à seguinte expressão:

$$4.H_{cf}l_{cf} + 2.H_{mp}l_{mp} + 4.H_g l_g + 2.H_p l_p = 0 \quad (5.14)$$

Partindo da equação de Maxwell que traduz a lei da Conservação do Fluxo ( $\oint_S \vec{B}.d\vec{S}$ ), considerando meios lineares e homogéneos, e sabendo que  $B = \mu H$ , é possível estabelecer a igualdade:

$$B_{cf} A_{cf} = B_{mp} A_{mp} = B_g A_g = B_p A_p \quad (5.15)$$

A equação 5.14 pode então s/

er reescrita na forma de  $H_{mp}$  em função de  $B_{mp}$ :

$$H_{mp} = -\frac{A_{mp}}{\mu_0 l_{mp}} \cdot \left[ \frac{2.l_{cf}}{\mu_{cf} \cdot A_{cf}} + \frac{2.l_g}{A_g} + \frac{l_p}{\mu_p \cdot A_p} \right] \cdot B_{mp} \quad (5.16)$$

De forma a simplificar a parameterização da topologia, definiram-se as seguintes igualdades:

$$\begin{cases} A_{mp} = A_{cf} = A_g = A_p \\ A_p = A_g = S_g \end{cases} \quad (5.17)$$

A figura 5.3 ilustra a referida parameterização, de onde se tiram as considerações seguintes:

$$\begin{cases} A_{mp} = S_{mp} = h_{rotor}^2 \\ w_{cf} = h_{rotor} \\ S_g = S_{mp} \end{cases} \quad (5.18)$$

A expressão da recta de carga será, então, a seguinte:

$$\frac{B_{mp}}{H_{mp}} = - \frac{\mu_0 \cdot l_{mp} \cdot \mu_{cf} \cdot \mu_p}{2l_{cf} \cdot \mu_p + 2l_g \cdot \mu_{cf} \cdot \mu_p + l_p \cdot \mu_{cf}} \quad (5.19)$$

Observando a equação 5.19 e presumindo que  $\mu_{cf} = \mu_p$  é possível chegar-se a uma razão óptima aproximada entre a distância do entreferro e a espessura do magneto permanente:

$$\frac{B_{mp}}{H_{mp}} \cong -\mu_0 \cdot \frac{l_{mp}}{2l_g} \Rightarrow l_{mp} \cong 2l_g \quad (5.20)$$

Pelo resultado da equação (5.20), alcançar o ponto de funcionamento óptimo implicaria utilizar magnetos permanentes com uma espessura duas vezes superior ao comprimento do entreferro. Tal dimensionamento resultaria em magnetos permanentes demasiado estreitos, ou em entreferros demasiado largos, pelo que todo o benefício retirado da utilização do material magnético activo com o seu produto energético máximo, seria perdido face à dispersão de fluxo magnético resultante de tal parameterização.

De forma a obter-se um rendimento considerável, quanto ao uso de material magnético activo, será utilizada uma razão não óptima entre a distância do entreferro e a espessura do magneto permanente de  $\frac{l_{mp}}{l_g} = 10$ . Este valor foi escolhido de forma a poder-se utilizar, tanto

um entreferro estreito, como magnetos permanentes com dimensões disponíveis no mercado. Tal como foi referido, este valor não se encontra próximo do que seria considerado óptimo

( $\frac{l_{mp}}{l_g} \cong 2$ ). Assim, será efectuada uma compensação parcial, aproximando o ponto de

funcionamento da máquina do considerado óptimo, através do seguinte ajuste de áreas de secção:

$$\begin{cases} A_{mp} = A_{cf} \\ A_p = A_g = K.A_{mp} = S_g \end{cases} \quad (5.21)$$

A constante  $K$  representará o valor ideal para a razão entre a área de secção do magneto permanente e a área de secção do entreferro.

As considerações anteriores traduzem-se na parameterização seguinte:

$$\begin{cases} A_{mp} = S_{mp} = h_{rotor}^2 \\ w_{cf} = K.h_{rotor} \\ l_{cf} = \frac{h_{rotor} + w_{cf}}{2} \\ S_g = K.S_{mp} \end{cases} \quad (5.22)$$

A equação da recta de carga passa, assim, a ter a seguinte expressão:

$$\frac{B_{mp}}{H_{mp}} = -K \cdot \frac{\mu_0 \cdot l_{mp} \cdot \mu_{cf} \cdot \mu_p}{2 \cdot l_{cf} \cdot \mu_p + 2 \cdot l_g \cdot \mu_{cf} \cdot \mu_p + K \cdot l_p \cdot \mu_{cf}} \quad (5.23)$$

Para se encontrar o valor óptimo de  $K$ , a equação da recta de carga obtida na expressão anterior é igualada à equação da recta de carga ideal (equação 5.13). O valor para  $K_{\text{óptimo}}$  resulta em aproximadamente 0,2. Em condições ideais, sem saturação magnética dos materiais, este seria o valor óptimo para a razão entre as áreas de secção do entreferro e do magneto permanente. No entanto, pretende-se estudar o comportamento real da máquina e, como tal, existirão limitações associadas aos materiais utilizados. Visto que, para além de se reduzir a área de secção do entreferro através da manipulação da constante  $K$ , existirá ainda uma redução da área de secção dos pólos em ‘U’ inata à forma geométrica dos mesmos, tal valor para a constante  $K$  resultaria em densidades de fluxo magnético superiores às suportadas



pelos materiais que constituem o estator e o rotor da máquina. A partir da figura 5.7, e sabendo que o comprimento  $h_{pólo}$  será dado pela soma da altura do enrolamento ( $h_{enr}$ ), com a espessura do pólo ( $h_{rótor}$ ) e com a distância do enrolamento ao entreferro ( $\Delta enr$ ), é possível estabelecer as seguintes relações:

$$\begin{cases} h_{pólo} = \Delta enr + h_{enr} + h_{rótor} \\ w_p = w_{cf} + \Delta L_{cf} - 2 \cdot \tan(\varphi_{cf}) \cdot (h_{rótor} + l_g + h_{pólo}) \end{cases} \quad (5.24)$$

A área de secção mínima, para o pólo em ‘U’ dependerá da área do concentrador de fluxo, já que esta é proporcional a  $w_{cf}$ . Para a altura do enrolamento  $h_{enr}$  foi considerado um comprimento de 1 cm, de acordo com a equação (5.50), e para a distância  $\Delta enr$  entre o topo do enrolamento e o entreferro foi considerado também um comprimento de 1 cm.

Na figura 5.6 encontram-se representados, em função de  $K$ , os valores de densidade de fluxo magnético nos magnetos permanentes e na zona onde a área de secção do pólo em ‘U’ é mínima. Considerando o valor de 2,2 tesla para o qual o ferro utilizado entrará em zona de saturação, verifica-se que o valor para a constante  $K$  não deverá ser inferior a 0,7 traduzindo-se assim, o ponto de funcionamento da máquina num valor de densidade de fluxo magnético não inferior a 1,06 tesla.

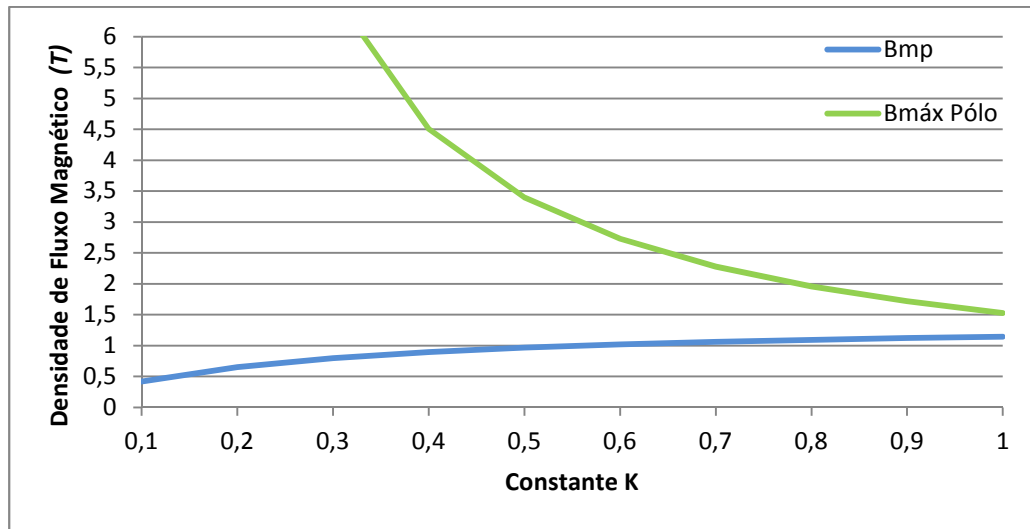


Figura 5.6 — Densidade de fluxo magnético em função da constante  $K$ .

De acordo com os cálculos descritos, serão utilizados os seguintes valores para os parâmetros analisados:

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
$\mu_{cf}$	4000
$\mu_p$	4000
$h_{rotor}$	5 cm
$l_g$	1 mm
$l_{mp}$	1 cm
$l_p$	27cm
$K$	0,7
$w_{cf}$	3,5 cm
$w_{separator}$	10 cm
$h_{pólo}$	6 cm

Tabela 5.2 — Dimensionamento para o modelo da topologia em estudo.

O raio do rotor da máquina será dado por:

$$R_{rotor} = \frac{P_{pólos} \cdot (w_{cf} + l_{mp})}{\pi} \quad (5.25)$$

De notar que os valores considerados para as distâncias  $l_{mp}$  e  $l_{cf}$  são valores médios de forma a facilitar os cálculos. Como pode ser observado na figura 5.7, tanto os concentradores de fluxo como os magnetos permanentes não têm a forma de paralelepípedos perfeitos. A face superior de cada componente terá um comprimento longitudinal maior que o da face inferior. As expressões aproximadas para cada um dos comprimentos podem ser obtidas pelas considerações trigonométricas da figura 5.7.

O ângulo para o passo polar é dado por:

$$\theta = \frac{360}{2.P_{\text{pólos}}} \quad (5.26)$$

Para se obterem os ângulos  $\varphi_{cf}$  e  $\varphi_{mp}$ , que permitem calcular as distâncias  $\Delta L_{cf}$  e  $\Delta L_{mp}$ , respectivamente, é feita a consideração,  $\theta \rightarrow l_m + w_{cf}$ , onde  $\theta = 2.(\varphi_{cf} + \varphi_{mp})$ , pelo que:

$$\begin{cases} \varphi_{cf} = \frac{\theta}{2} \cdot \frac{w_{cf}}{w_{cf} + l_m} \\ \varphi_{mp} = \frac{\theta}{2} \cdot \frac{l_m}{w_{cf} + l_m} \end{cases} \quad (5.27)$$

Por sua vez,  $\Delta L_{cf}$  e  $\Delta L_{mp}$  são dados por:

$$\begin{cases} \Delta L_{cf} = \text{arctg}(\varphi_{cf}).h_{\text{rotor}} \\ \Delta L_{mp} = \text{arctg}(\varphi_{mp}).h_{\text{rotor}} \end{cases} \quad (5.28)$$

O rotor da máquina terá, então, com este último dimensionamento considerado de  $\frac{l_{mp}}{l_g} = 10$ ,

um raio de 31,14 cm.

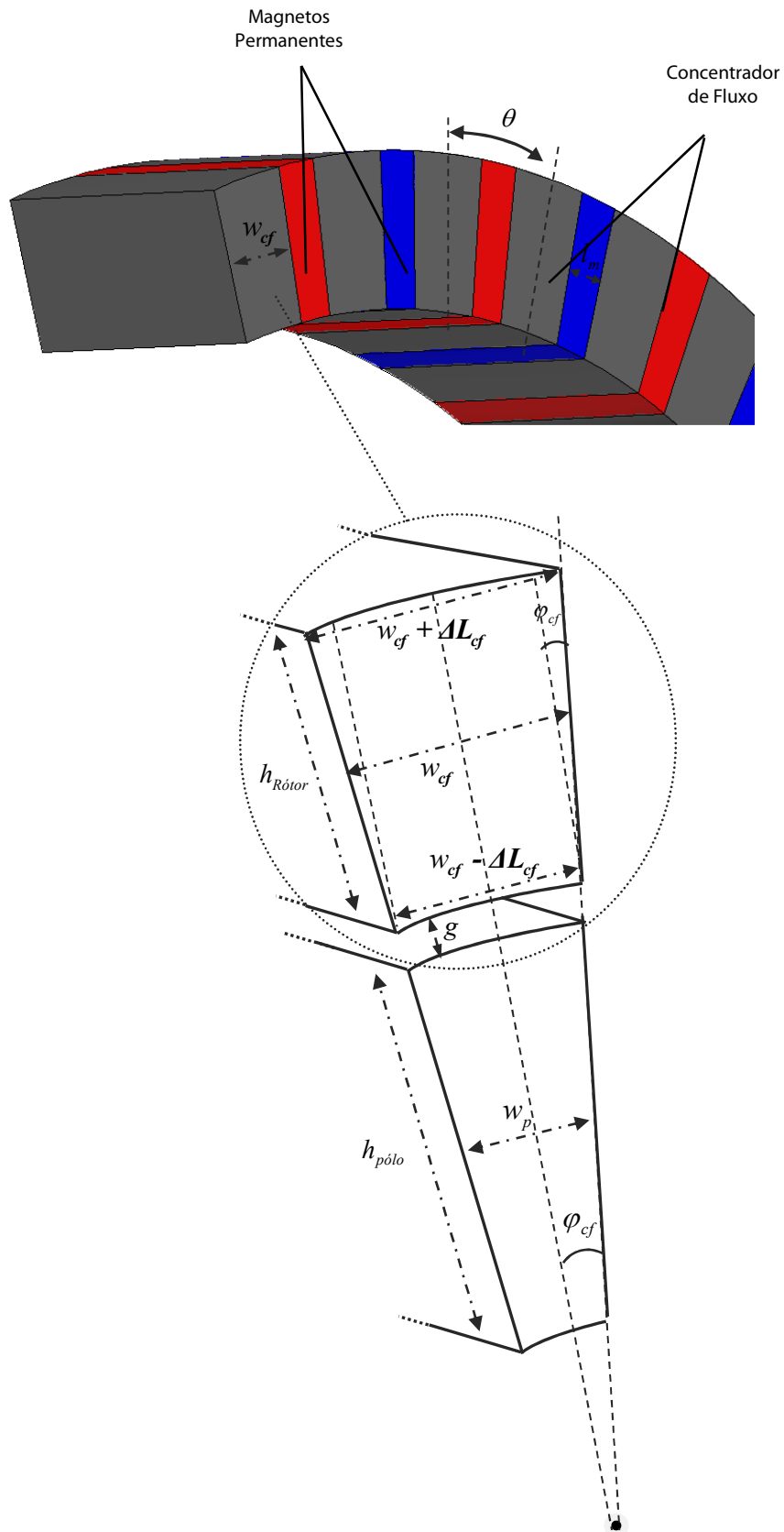


Figura 5.7 — Esquema detalhado para o cálculo das dimensões dos componentes do rotor.

## 5.7. Fluxo Magnético por Pólo

A topologia em análise é algo particular. Cada trajecto magnético é partilhado por dois circuitos magnéticos. Utilizando a simbologia dos circuitos eléctricos, é possível representar e analisar, com maior facilidade, este aspecto. Visto que todos os circuitos magnéticos da máquina estão igualmente dimensionados, cada trajecto magnético pode ser reduzido ao esquema da figura 5.8.

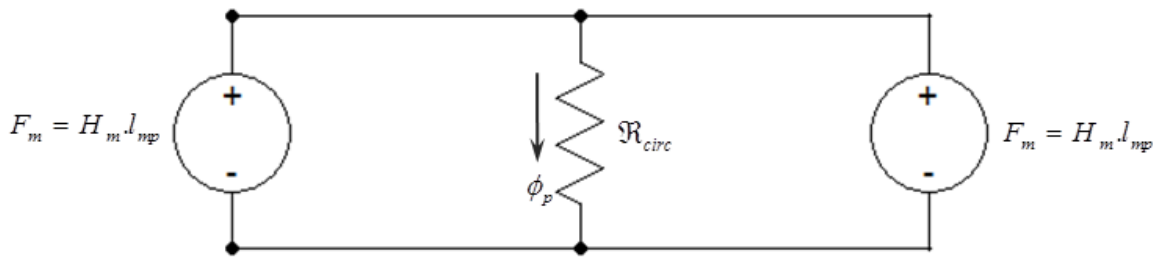


Figura 5.8 — Esquema eléctrico representativo do trajecto magnético de um par de pólos.

A partir da expressão  $B = \frac{\phi}{A}$  retira-se o valor do fluxo que circula em cada par de pólos. Como as fontes de força magnetomotriz são iguais e se encontram em paralelo:

$$\phi_p = B_{mp} \cdot A_{mp} = B_{mp} \cdot h_{rotor}^2 \quad (5.29)$$

Sendo  $B_{mp} = 1,06$  tesla, o valor aproximado da densidade de fluxo magnético do magneto permanente, o fluxo por pólo terá o valor  $\phi_p = 2,66$  mWb.

Definindo  $P_{pólos}$  como o número de pares de pólos presente na máquina, o fluxo ligado pelas  $N$  espiras do enrolamento resultará na expressão seguinte:

$$\psi = N \cdot P_{pólos} \cdot B_{mp} \cdot h_{rotor}^2 \quad (5.30)$$

## 5.8. Circuito Equivalente

O circuito equivalente para o gerador em análise encontra-se representado na figura 5.9.

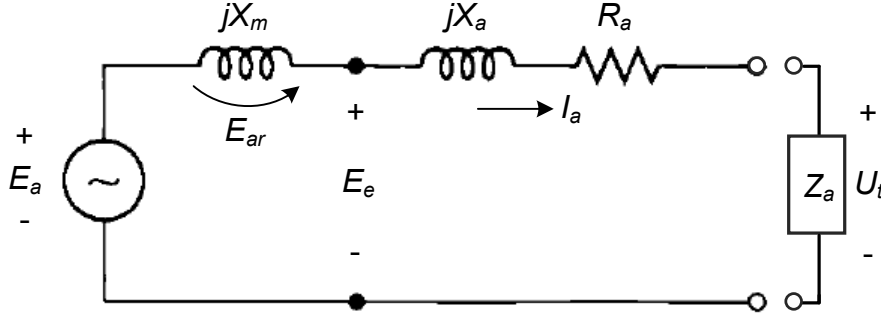


Figura 5.9 — Circuito equivalente do gerador eléctrico.

A resistência correspondente ao enrolamento do induzido, a tensão induzida por fase e a corrente por fase fornecida pelo gerador à carga  $Z_a$ , encontram-se representadas por  $R_a$ ,  $E_a$  e  $I_a$ , respectivamente. A corrente  $I_a$ , ao circular no enrolamento do induzido, produz um fluxo magnético. Parte desse fluxo magnético, denominada por fluxo de dispersão e representada por  $\phi_{ar}$ , é sentida apenas pelo enrolamento do induzido e resulta numa reactância de dispersão  $X_a$ . O fluxo magnético produzido pelo enrolamento do induzido reage com o fluxo resultante da acção dos magnetos permanentes existentes no rotor, causando uma alteração no fluxo magnético resultante. Esta interacção é conhecida como reacção do induzido. O fluxo efectivo por pólo do gerador resulta na soma dos dois fluxos, ou seja,  $\phi_e = \phi_p + \phi_{ar}$ . O fluxo  $\phi_{ar}$ , por sua vez, induz uma f.e.m.  $E_{ar}$  no enrolamento do induzido, denominada de f.e.m. de reacção do induzido. Esta tem um desfasamento de  $90^\circ$  em relação ao fluxo  $\phi_{ar}$ , pelo que a tensão efectiva gerada por fase  $E_e$  resulta na soma algébrica da tensão em vazio  $E_a$  e a f.e.m. de reacção do induzido  $E_{ar}$ , ou seja,  $E_e = E_a + E_{ar}$ .

A tensão por fase, aos terminais do gerador, é obtida pela seguinte expressão:

$$\bar{E}_e = \bar{U}_t + \bar{I}_a \cdot (R_a + jX_a) \quad (5.31)$$

Visto que  $E_{ar}$  está atrasada  $90^\circ$  em relação à corrente  $I_a$ , também pode ser expressa por  $\bar{E}_{ar} = j\bar{I}_a.X_m$ , onde  $X_m$  é uma constante de proporcionalidade denominada de reactância de magnetização.

Tanto a reactância de magnetização como a reactância de dispersão estão presentes simultaneamente. Sendo difícil separá-las, as duas reactâncias são agregadas na soma  $X_s = X_m + X_a$ , designada por reactância síncrona.

Pode-se, assim, definir a impedância síncrona como:

$$\bar{Z}_s = R_a + jX_s \quad (5.32)$$

A expressão para a tensão aos terminais será, então, a seguinte:

$$\bar{U}_t = \bar{E}_a - \bar{I}_a.(R_a + jX_s) \quad (5.33)$$

Que pode ser simplificada e escrita da seguinte forma:

$$\bar{U}_t = \bar{E}_a - \bar{I}_a.(\bar{Z}_s) \quad (5.34)$$

### 5.8.1. *Resistência do Enrolamento*

Sendo  $R_a$  a resistência por fase do enrolamento, então  $I_a.R_a$  será a queda de tensão correspondente. Visto  $R_a$  ser uma fonte de perdas, deverá ser mantida tão reduzida quanto for possível.

A expressão da resistência do enrolamento é dada por:

$$R_a = \frac{\rho_{Cu}.l_{enr}}{S_{Cu}} \quad (5.35)$$

Em que o comprimento  $l_{enr}$  é dado pelo produto entre o número de espiras do enrolamento e o perímetro médio de cada espira:

$$l_{enr} = N_{espiras} \cdot Per_{enr} \quad (5.36)$$

$$Per_{enr} = 2\pi \cdot \left[ R_{r\acute{o}tor} - h_{r\acute{o}tor} - \left( \frac{h_{p\acute{o}lo} - h_{r\acute{o}tor}}{2} \right) \right] \quad (5.37)$$

O valor final para a resistência do enrolamento é, então, de:

$$R_a = 23,76 \, \Omega$$

### 5.8.2. *Reactância do Enrolamento*

Para reactâncias indutivas tem-se a seguinte relação:

$$X_L = \omega \cdot L \quad (5.38)$$

Sendo a expressão da indutância dada por:

$$L = \frac{N^2}{\Re} \quad (5.39)$$

Onde  $\Re$  corresponde à relutância do circuito magnético e  $N$  ao número de espiras do enrolamento do induzido.

A partir da equação para a relutância total (equação 5.3) e sabendo que a reactância síncrona é dada por  $X_s = \omega \cdot L$ , tem-se que:

$$X_s = \frac{2 \cdot \omega \cdot N^2 \cdot P_{p\acute{o}los}}{\mu_0} + \left[ 2 \cdot \frac{l_g}{S_g} + \frac{l_{mp}}{\mu_{mp} \cdot S_{mp}} \right] \quad (5.40)$$

De onde se retira o valor final para a reactância síncrona, considerando uma velocidade síncrona de 50 Hz:



$$X_s = 1,99 \, \Omega$$

## 5.9. Força Electromotriz Induzida

Segundo a lei geral da indução, e para o gerador em questão, a f.e.m. induzida num enrolamento de  $N$  espiras é dada pela expressão:

$$e(t) = -N.P_{\text{pólos}} \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (5.41)$$

Decorrente do movimento rotacional do gerador, o fluxo ligado com cada espira pode ser expresso como uma função coseno,

$$\phi = \phi_p \cdot \cos(\theta) \quad (5.42)$$

onde  $\theta$  corresponde à posição angular do rotor em graus eléctricos. A expressão pode ser reescrita da seguinte forma:

$$e(t) = N.P_{\text{pólos}} \cdot \phi_p \cdot \sin(\theta) \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (5.43)$$

A posição angular pode ser dada em função da velocidade angular eléctrica

$$\theta = \omega t \quad (5.44)$$

pelo que, a expressão final da f.e.m. induzida será a seguinte:

$$e(t) = N.P_{\text{pólos}} \cdot \phi_p \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \quad (5.45)$$

A f.e.m. induzida será máxima quando a função seno também o for, logo

$$E_{m\acute{a}x} = N.P_{p\acute{o}los}.\phi_P.\omega \quad (5.46)$$

Pretende-se obter uma potência activa de saída de 10 kW. Utilizando um enrolamento com  $N=1000$  espiras, obtém-se um fluxo ligado de  $\psi=53,2$  Wb (equação 5.30). A f.e.m. máxima induzida no enrolamento terá o valor de  $E_{m\acute{a}x}=16740,3$  V. O valor eficaz para a f.e.m. induzida esperada será então de  $E_{ef} = \frac{16740,3}{\sqrt{2}} = 11837,2$  V. (5.47)

Visto ter-se observado, no capítulo 5.8, que os valores relativos à resistência e à reatância do enrolamento são bastante baixos, e visto que o valor da f.e.m. é bastante elevado, resultando num valor baixo de corrente necessária para atingir a potência nominal, pode considerar-se que o ângulo de carga  $\delta$  é aproximadamente nulo e que:

$$E_{ef} = U_{ef} \quad (5.48)$$

O condutor de cobre deverá, então, ser capaz de transportar uma corrente eficaz de:

$$I_{ef} = \frac{P}{U_{ef}} = 0,84 \text{ A} \quad (5.49)$$

Tomando como valor sobredimensionado de secção do condutor  $A_{Condutor} = 1 \text{ mm}^2$  [25], a área total necessária para o enrolamento será então de  $A_{Enrolamento} = 10 \text{ cm}^2$  (5.50)

## 5.10. Densidade de Binário

Como já foi referido no capítulo 3.6, por norma, um gerador de aplicação directa terá um diâmetro bastante elevado quando comparado com topologias convencionais. Fará sentido desenhar uma máquina que, com uma dimensão reduzida, produza a potência necessária à saída. Uma forma de analisar a qualidade da máquina, em função da sua dimensão, será através do cálculo da densidade de potência. Contudo, como a potência de saída da máquina aumenta directamente com o aumento da velocidade de rotação, pode ser utilizada a

densidade de binário para este efeito, eliminando uma variável desnecessária. A densidade de binário pode ser definida da seguinte forma:

$$T_d = \frac{T}{\pi.(R_{rotor} + l_g + h_{pólo})^2.(2.h_{rotor} + w_{separador})} , \quad (5.51)$$

onde  $T$  será o binário electromagnético resistente instantâneo da máquina, cujo valor máximo é dado por:

$$T = p_{pólos} \cdot \frac{P}{\omega} \quad (5.52)$$

Através dos diversos passos descritos neste capítulo chegou-se a um dimensionamento para um gerador de fluxo transversal com magnetos permanentes (*TFPM*) e foram ainda calculados os valores para as diferentes características de saída da máquina que serão esperados. No Capítulo 6 será estudado um modelo construído com base neste dimensionamento.



## Simulações

### 6.1. Introdução

**N**O capítulo anterior foi feito um dimensionamento do gerador que, em teoria, permitirá tirar o máximo partido dos materiais utilizados na topologia, fornecendo à saída da máquina uma potência de 10 kW. De forma a comprovar os cálculos analíticos efectuados, referentes ao dimensionamento e aos valores para as características de saída da máquina, o capítulo 6 descreve algumas simulações obtidas para esse efeito. Através da utilização de um *software* baseado no método de elementos finitos, foi construído um modelo gráfico da topologia em estudo, de forma a serem realizadas várias simulações para analisar o comportamento da máquina. Cada uma das características de construção da máquina foi parameterizada, permitindo que variações e ajustes pudessem ser feitos de forma rápida e simples.

No âmbito de se compreender, com razoável detalhe, se os resultados obtidos pelos ensaios são coerentes com os resultados analíticos, foram realizadas diversas séries de ensaios, com a variação dos valores de alguns parâmetros chave para o ponto de funcionamento da máquina.

Analizou-se ainda, a título de comparação, o efeito da adição de um segundo enrolamento à topologia, no comportamento do gerador.

## 6.2. Estudo da Topologia com Enrolamento Simples

No presente capítulo inicia-se a análise da topologia de enrolamento simples, com estudos relativos ao funcionamento do gerador em vazio, e ainda com cargas resistivas e indutivas. Posteriormente será ainda estudado o efeito da alteração de alguns parâmetros no comportamento do gerador.

Na figura 6.1 encontra-se representado o modelo utilizado no simulador de elementos finitos para o estudo desta topologia. O modelo encontra-se parameterizado de acordo com os cálculos efectuados no capítulo anterior. Os pólos em ‘U’ do estator superior não se encontram optimizados. O seu tamanho poderia ser reduzido. Porém, para efeitos de estudo do funcionamento da máquina com duplo estator, atribui-se a mesma medida de comprimento tanto para o estator superior como para o inferior.

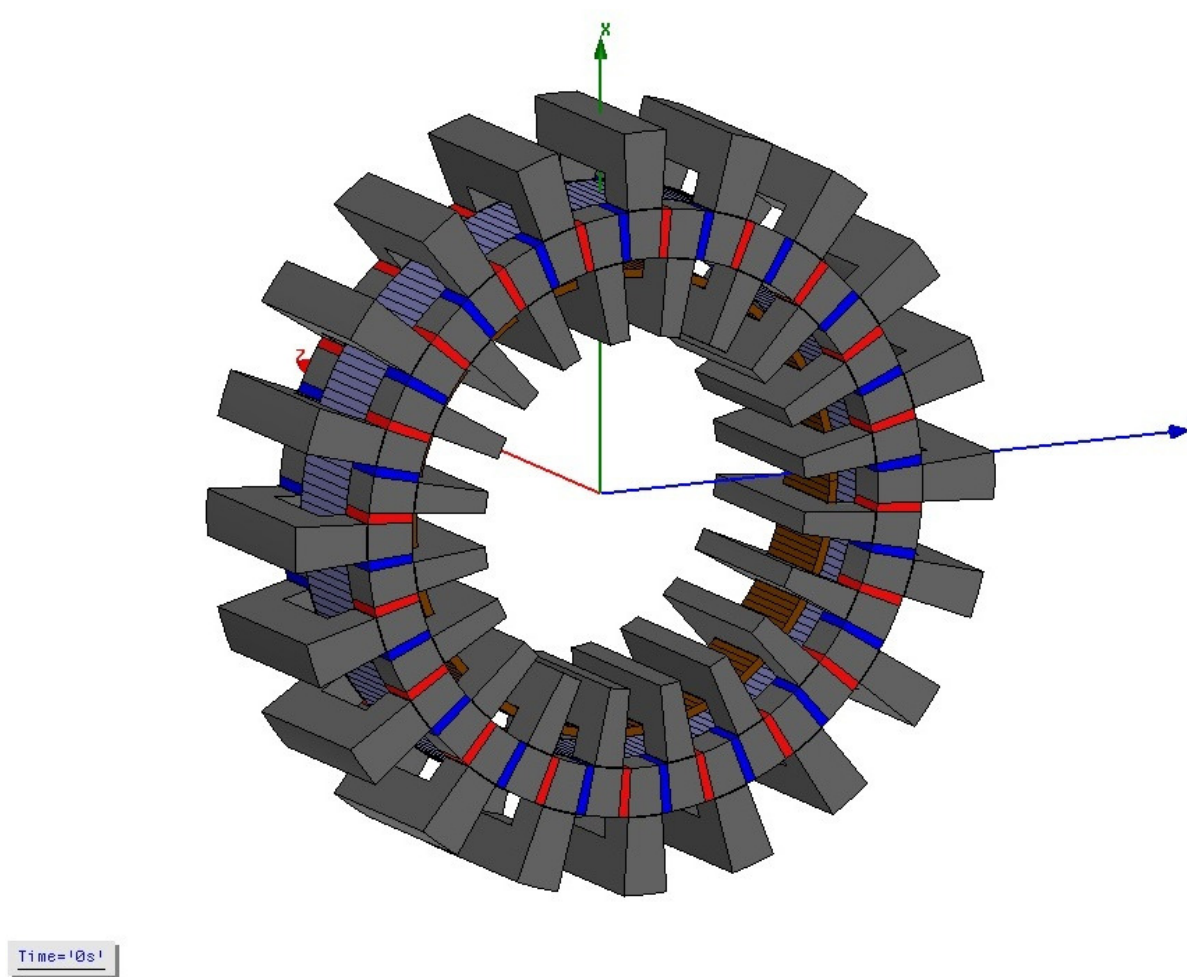


Figura 6.1 — *Modelo de Elementos Finitos para a TFPM de estator duplo e enrolamento simples dimensionada.*

### 6.2.1. *Ensaio em Vazio*

A fase de ensaios da topologia completa inicia-se com o gerador a ser accionado em vazio, a uma velocidade de rotação constante de 150 rpm. Como seria de esperar, observa-se que os valores de densidade de fluxo magnético em cada um dos troços que constituem os circuitos magnéticos considerados, são bastante superiores aos valores registados nos restantes componentes.

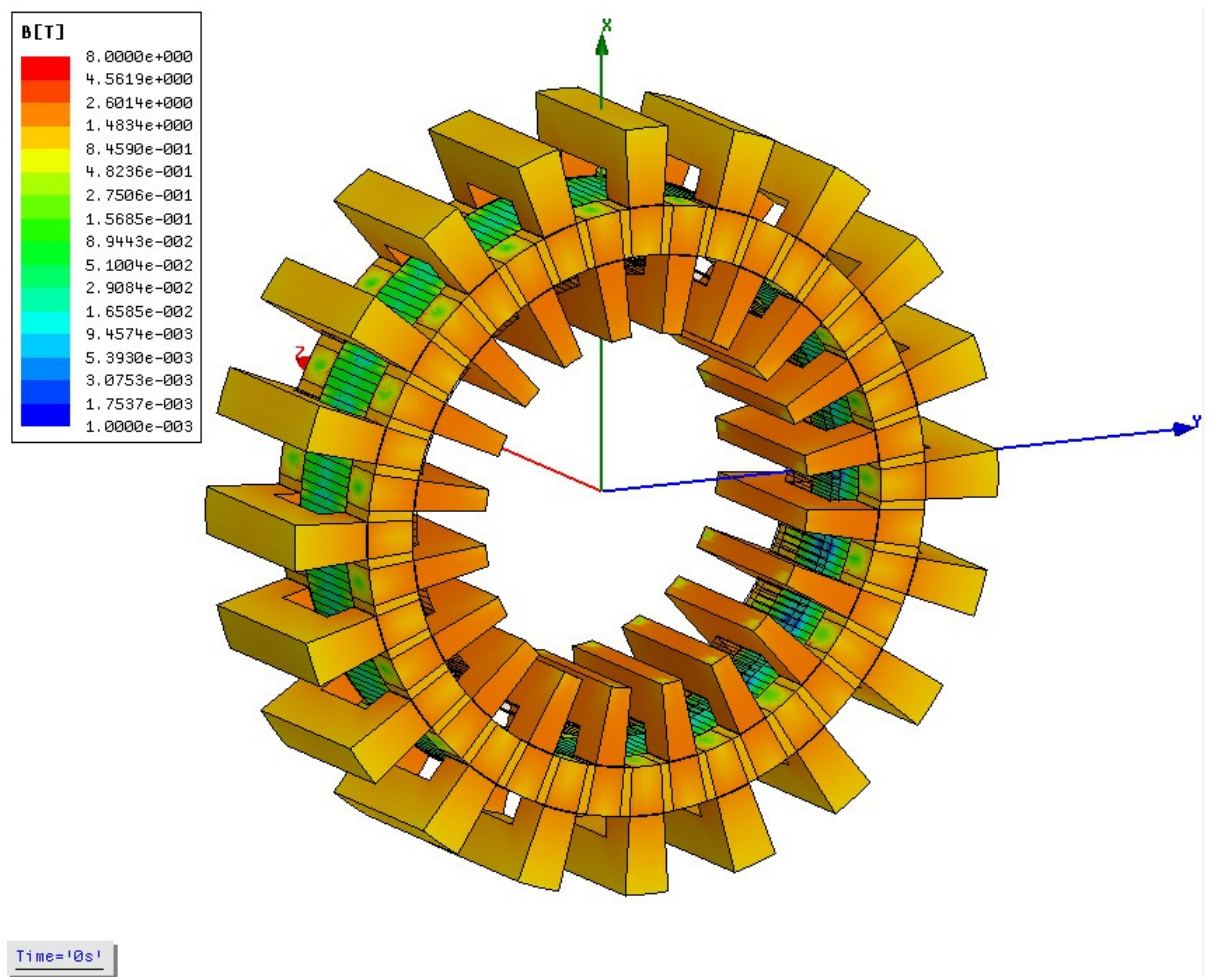


Figura 6.2 — Densidade de fluxo magnético para a TFPM de estator duplo e enrolamento simples dimensionada, no ensaio em vazio.

O trajecto seguido pelo fluxo, no instante de tempo em que a máquina inicia o movimento, encontra-se representado na figura 6.3. O fluxo magnético mantém-se contido dentro do trajecto definido, não apresentando uma dispersão significativa.

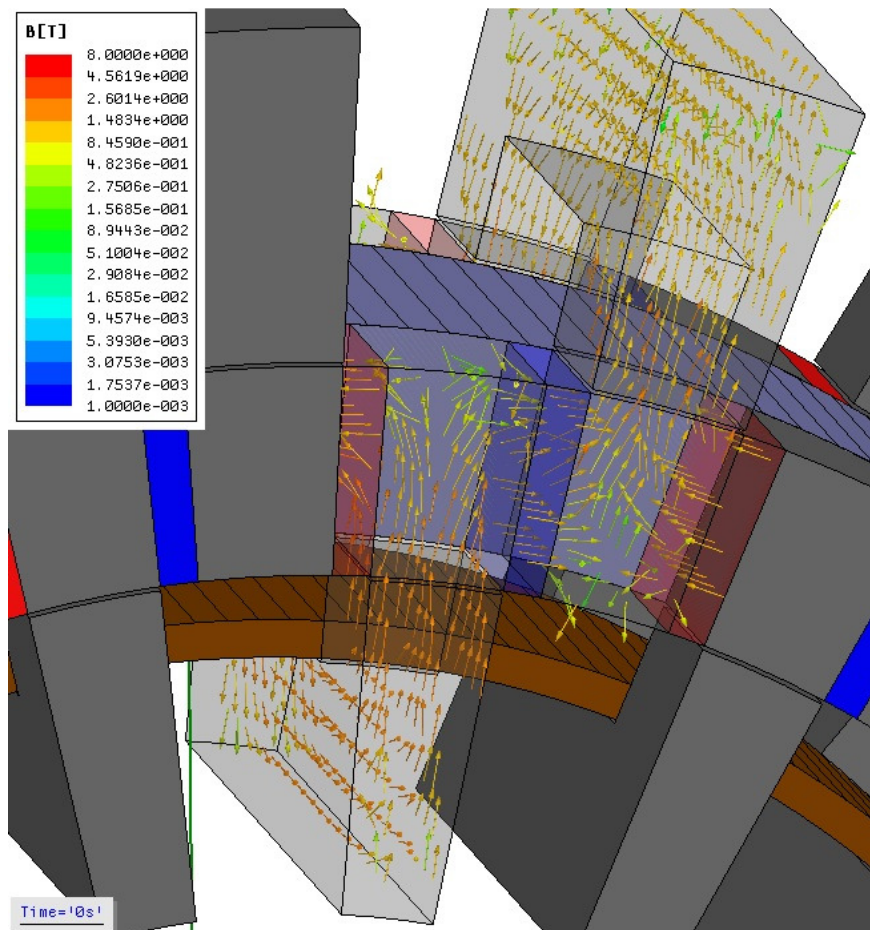


Figura 6.3 — Direcção tomada pelo fluxo magnético para a TFPM de estator duplo e enrolamento simples dimensionada.

À medida que o rotor vai girando, o fluxo ligado vai diminuindo, voltando a ser máximo a cada passo polar, ainda que a polaridade seja invertida a cada distância de passo polar.



O comportamento descrito pode ser verificado na figura 6.4. Encontram-se representadas as ondas referentes ao fluxo total ligado e à f.e.m. total induzida, para o ensaio em vazio.

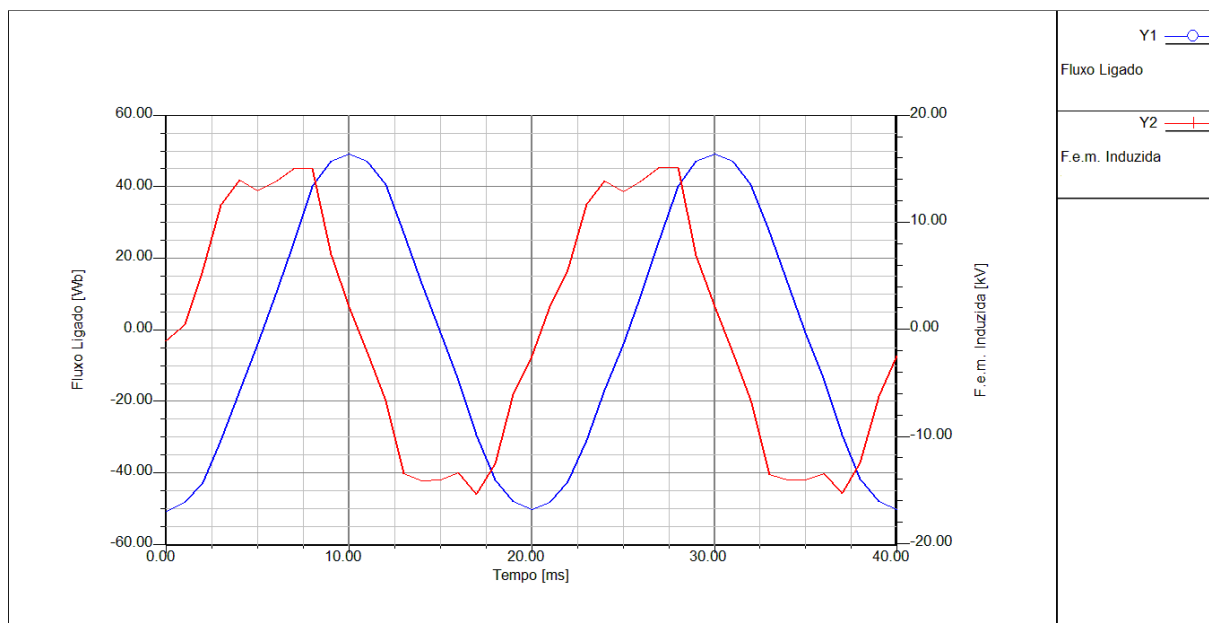


Figura 6.4 — Resultados da simulação para o ensaio em vazio, com os valores de fluxo ligado e f.e.m. induzida.

Em condições ideais de funcionamento, o valor de fluxo magnético ligado pelas 1000 espiras do enrolamento do estator deveria rondar os 53  $Wb$  (equação 5.30). Devido à dispersão de fluxo magnético, seria esperada uma discrepância significativa entre os valores obtidos através dos cálculos analíticos e os valores obtidos na simulação. No entanto, tanto o fluxo total ligado, como a f.e.m. induzida, apresentam-se apenas ligeiramente afectados, com valores bastante aproximados dos obtidos analiticamente.

### 6.2.2. Ensaio com Carga Puramente Resistiva

Neste ensaio pretende-se observar o comportamento do gerador quando accionado na presença de uma carga puramente resistiva aos seus terminais. É a medição da corrente que atravessa a carga que permitirá calcular a potência de saída da máquina. A carga a aplicar foi então dimensionada de forma a obter-se o valor de potência nominal. Utilizando os valores de

tensão eficaz e corrente eficaz calculados nas equações (5.46) e (5.48), calcula-se a carga a aplicar à saída do gerador:

$$Z_a = \frac{U_{ef}}{I_{ef}} = 14011 \, \Omega \quad (6.1)$$

A figura 6.5 representa o sistema considerado, no qual foi introduzida uma carga resistiva de 14 k $\Omega$ , em série com o enrolamento da máquina.

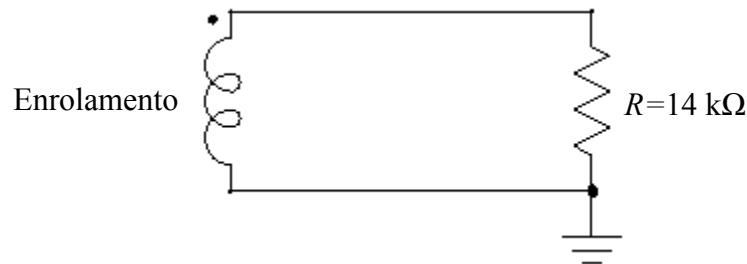


Figura 6.5 — Circuito com carga puramente resistiva aos terminais do gerador.

O gerador foi posto em funcionamento com a mesma velocidade de rotação utilizada no ensaio anterior. Tanto neste ensaio, como no ensaio com carga indutiva, o rotor é colocado inicialmente numa posição magneticamente instável, de forma a atingir o equilíbrio magnético mais rapidamente.

Os resultados da simulação para o ensaio com carga puramente resistiva encontram-se na figura 6.6.

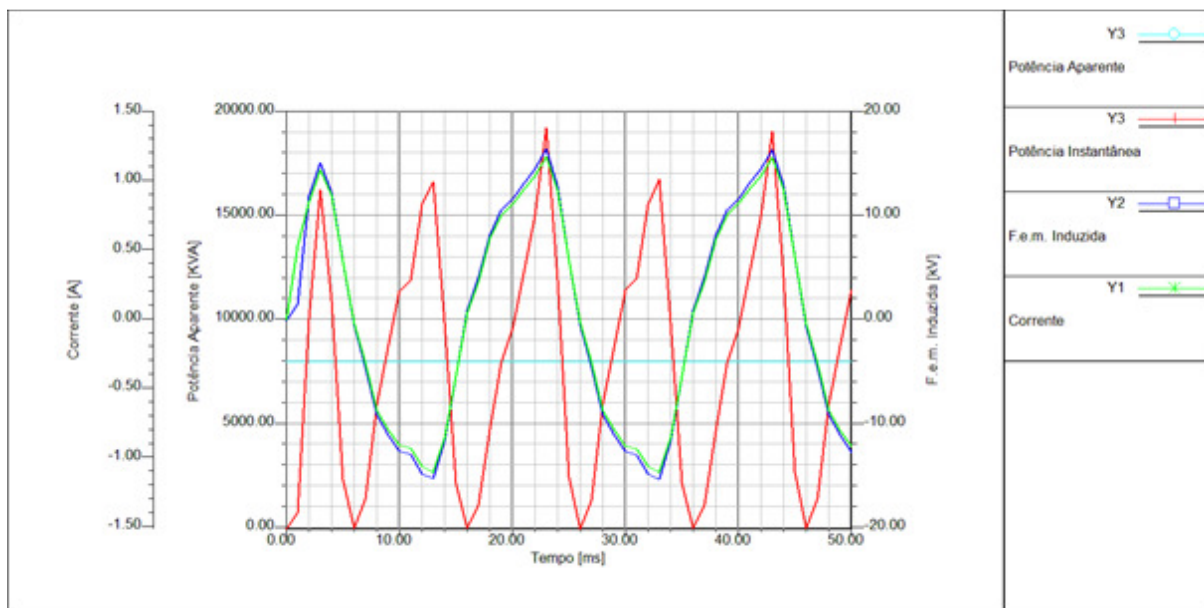


Figura 6.6 — Resultados da simulação para o ensaio com carga puramente resistiva, com os valores de f.e.m. induzida, corrente, potência instantânea e potência média.

Os valores máximos das sinusóides da corrente e da f.e.m. induzida podem ser retirados do gráfico. É possível observar que, uma vez que a carga utilizada é puramente resistiva, não existe defasamento entre estas duas ondas. O ângulo entre a f.e.m. induzida e a corrente é, então, nulo, pelo que o factor de potência será igual à unidade. Assim, desprezando possíveis harmónicas, a potência reactiva também será nula, pelo que a potência activa terá o valor da potência aparente:

$$\bar{S} = P + jQ \quad (6.2)$$

$$\varphi = 0^\circ \Rightarrow P = |\bar{S}| \quad (6.3)$$

Tanto a sinusóide referente à potência instantânea, como valor da potência aparente, se encontram representados na figura. Este último é calculado pelo produto entre os valores eficazes da corrente e da f.e.m. induzida e apresenta o valor de  $S = U_{ef} I_{ef} = 8046 \text{ VA}$ . Verifica-se, assim, que o valor obtido para a potência activa é um pouco inferior ao valor esperado. Este valor, inferior a 10 kW, poderá ter origem em possíveis perdas por efeito de Joule e perdas por magnetização, aliadas à forma irregular das ondas da f.e.m. e da corrente, visto que no dimensionamento da máquina foram assumidas sinusóides perfeitas para a característica externa da máquina.

Relativamente ao binário electromecânico resistente que a máquina exerce ao ser accionada a 150 rpm, a partir da equação (5.52) verifica-se que este atinge os 512,12 N.m. Através da aplicação da equação (5.51), é calculado um valor para a densidade de binário de:  $T_d = 5979,76 \text{ N.m/m}^3$ .

### 6.2.3. *Ensaio com Carga Puramente Indutiva*

À semelhança do ensaio anterior, no presente ensaio pretende-se observar o comportamento do gerador quando accionado na presença de uma carga. Neste ensaio será utilizada uma carga puramente indutiva. Visto esperar-se, neste caso, um valor de potência activa praticamente nulo, a carga foi dimensionada de forma a obter-se o valor de potência aparente equivalente ao do ensaio anterior, utilizando o mesmo valor de impedância de carga. O valor de potência reactiva será assim o valor de potência aparente, desprezando possíveis harmónicas.

$$\bar{S} = P + jQ \quad (6.4)$$

$$\varphi = 90^\circ \Rightarrow Q = |\bar{S}| \quad (6.5)$$

A indutância da carga foi então dimensionada de acordo com a velocidade angular do campo girante:

$$Z_a = \omega_{elec} \cdot L = 14011 \, \Omega \quad (6.6)$$

$$L = 44,6 \, \text{H} \quad (6.7)$$

A figura 6.7 representa o sistema considerado, no qual foi introduzida uma carga indutiva de 44,6 H, em série com o enrolamento da máquina.

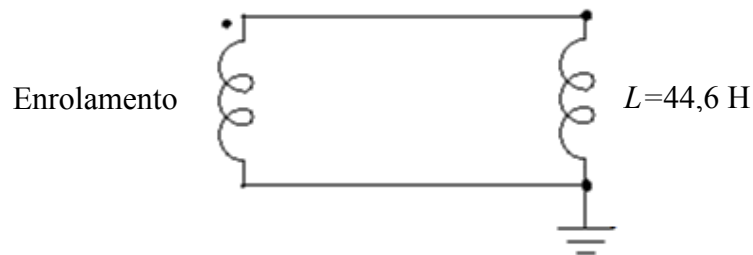


Figura 6.7 — Circuito com carga puramente indutiva aos terminais do gerador.

Os resultados da simulação para o ensaio com carga puramente indutiva encontram-se na figura 6.8.

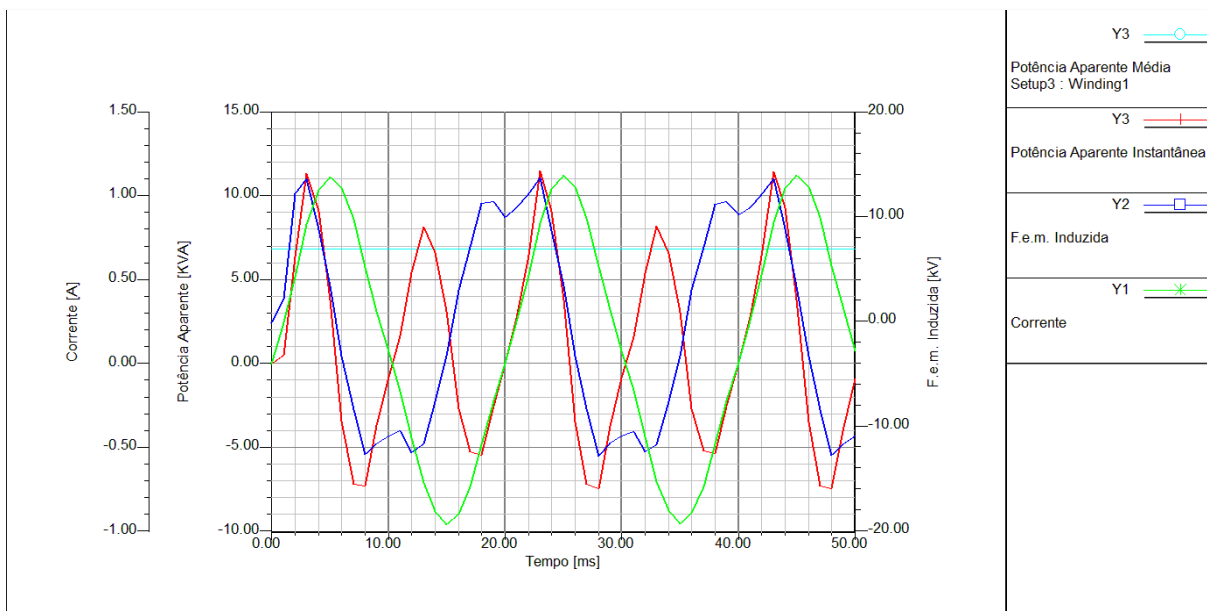


Figura 6.8 — Resultados da simulação para o ensaio com carga puramente indutiva, com os valores de f.e.m. induzida, corrente, potência instantânea e potência média.

Neste ensaio é visível a existência de um desfasamento entre a sinusóide da corrente e a sinusóide da tensão induzida correspondente a 90 graus, pelo que o factor de potência será nulo. O valor de potência aparente pode retirar-se do gráfico e apresenta o valor de  $S = U_{ef} \cdot I_{ef} = 6986 \text{ VA}$ . Tal como no ensaio anterior com carga resistiva, também neste ensaio se obtém um valor de potência aparente inferior aos 10 kVA esperados, que possivelmente se ficará a dever também, para além das perdas por efeito de Joule e de magnetização, à irregularidade das formas de onda das características, neste caso em particular, mais especificamente, do andamento da f.e.m. induzida.

### 6.3. **Análise de Parâmetros de Construção**

Os parâmetros de construção da máquina foram dimensionados de forma a se obter a potência de saída desejada, minimizando os custos relativos a material magnético activo e tendo em consideração o tamanho da máquina.

Com o objectivo de se confirmar a correcta parameterização da máquina, foram conduzidos diversos ensaios, analisando o comportamento da máquina quando sujeita a variações de alguns parâmetros de construção. Assim, em cada série de ensaios, foram mantidos todos os valores dos parâmetros dimensionados, à excepção do parâmetro que se pretende estudar em cada uma das séries.

#### 6.3.1. *Espessura do Magneto Permanente e Concentrador de Fluxo*

Inicialmente é estudada a variação das espessuras, tanto dos magnetos permanentes, como dos concentradores de fluxo. O produto entre estes dois parâmetros terá grande influência sobre o ponto de funcionamento da máquina. Os resultados encontram-se representados na figura 6.9.

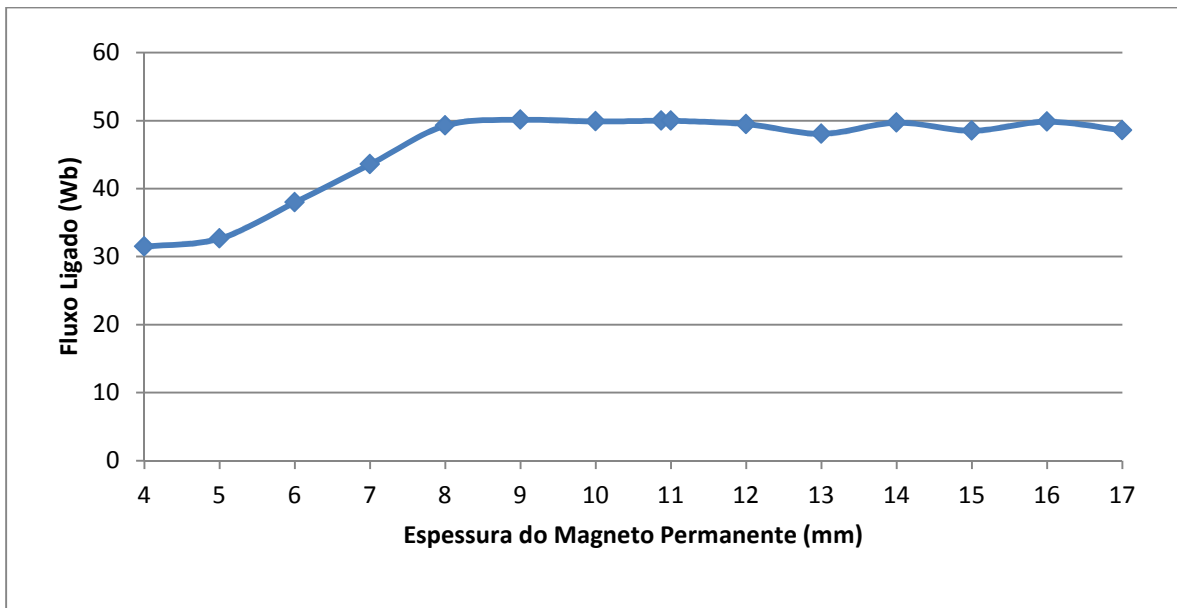


Figura 6.9 — Estudo do ponto óptimo para a espessura do magneto permanente.

Pretende-se manter o valor para o raio do rotor, logo, um aumento da espessura dos magnetos permanentes, traduz-se, directamente, na redução da espessura dos concentradores de fluxo, aplicando-se também o caso inverso. Observa-se que, a partir de uma espessura de 8 mm, o ferro entra em saturação, pelo que não existirá qualquer vantagem em se utilizarem magnetos permanentes mais espessos em detrimento da área de secção dos concentradores de fluxo. Verifica-se que o valor dimensionado de 1 cm para o valor óptimo de espessura do magneto permanente situa-se bastante próximo daquele que foi obtido através do método de elementos finitos.

### 6.3.2. *Comprimento de Entreferro*

A distância de entreferro é um dos parâmetros que causa maior impacto no ponto de funcionamento de uma máquina eléctrica. Para além de introduzir um acréscimo considerável na relutância de um circuito magnético é, ainda, uma fonte de dispersão de fluxo magnético.

Assim, quanto menor for esta distância, melhor será o rendimento do material utilizado. Tal característica pode ser observada na figura 6.10.

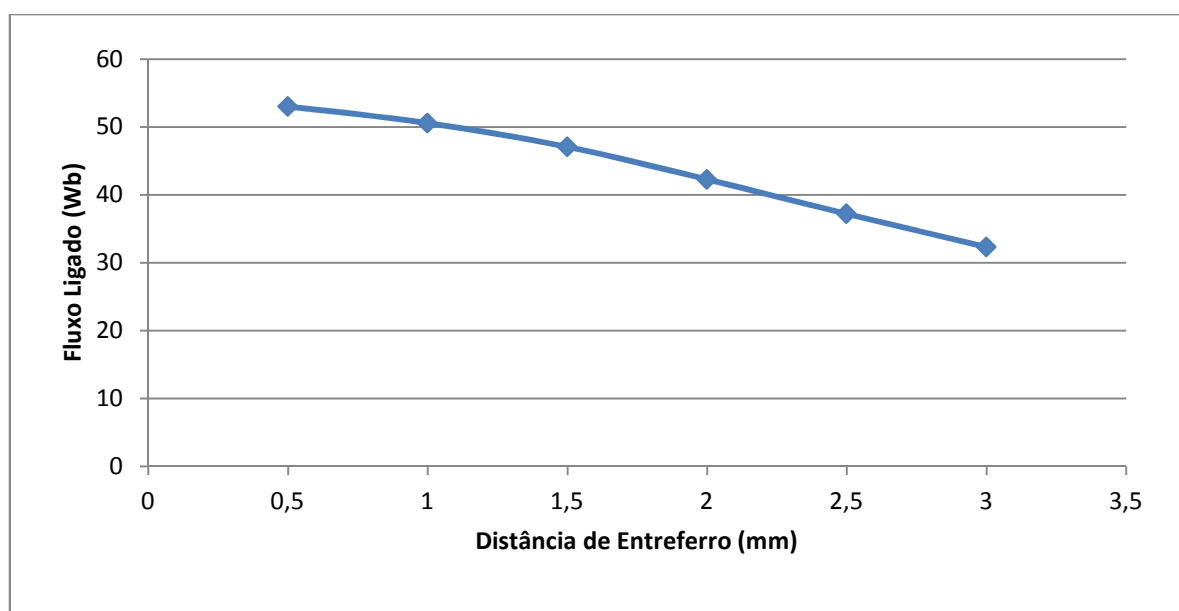


Figura 6.10 — Estudo do efeito da variação da distância de entreferro, no fluxo total ligado.

Contudo, a distância de entreferro não poderá ser demasiado próxima de zero, já que é esta distância que permite o movimento da máquina. Uma distância de entreferro demasiado curta pode resultar em contactos entre o estator e o rotor. O valor de 1 mm utilizado para o dimensionamento realizado parece restringir o fluxo de dispersão a valores aceitáveis (figura 6.3) e permite o funcionamento da máquina sem o risco de contactos mecânicos entre o rotor e o estator.

### 6.3.3. Escalabilidade do Dimensionamento

A parametrização realizada e analisada para a topologia em questão, foi dimensionada para uma potência nominal de saída de 10 kW. Para que esta topologia seja aplicada em sistemas reais de conversão de energia, será útil perceber qual a relação Potência/Custo esperada para geradores construídos a uma escala real. Esta relação pode ser reduzida à relação Binário/Custo, uma vez que desta forma a análise será independente da velocidade a que a máquina é accionada. Inicie-se esta análise pela observação da curva de variação do binário electromagnético em função da escalabilidade aplicada para a construção da máquina, representada na figura 6.11.

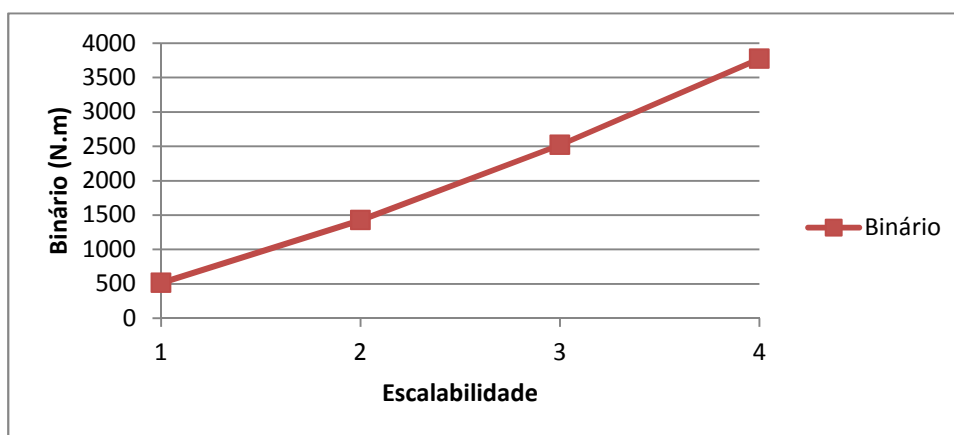


Figura 6.11 — *Estudo do efeito da escalabilidade da máquina, de até quatro vezes o dimensionamento actual, no binário electromagnético da máquina.*

Foram feitos ensaios para dimensões do gerador de até quatro vezes superiores ao dimensionamento inicial, representados no eixo das abcissas, incrementando todos os parâmetros chave do dimensionamento da máquina, tais como a superfície dos concentradores de fluxo e a superfície dos magnetos permanentes, à excepção do entreferro e do número de espiras. A carga resistiva à saída também foi mantida com o mesmo valor que no ensaio da secção 6.2.2. O incremento dos parâmetros do dimensionamento da máquina permite aumentar, proporcionalmente, o fluxo ligado pelo mesmo enrolamento da máquina inicial, mantendo o ponto de funcionamento desejado.

À medida que o tamanho da máquina é incrementado verifica-se que existe um aumento proporcional no binário electromagnético da máquina. O dimensionamento é assim aplicável a máquinas de maiores dimensões, onde são exigidas potências eléctricas mais elevadas. Faz sentido, portanto, perceber qual o custo associado ao incremento de dimensões da máquina. Na figura 6.12 encontra-se representada a relação entre o custo total da máquina face à escalabilidade da mesma.

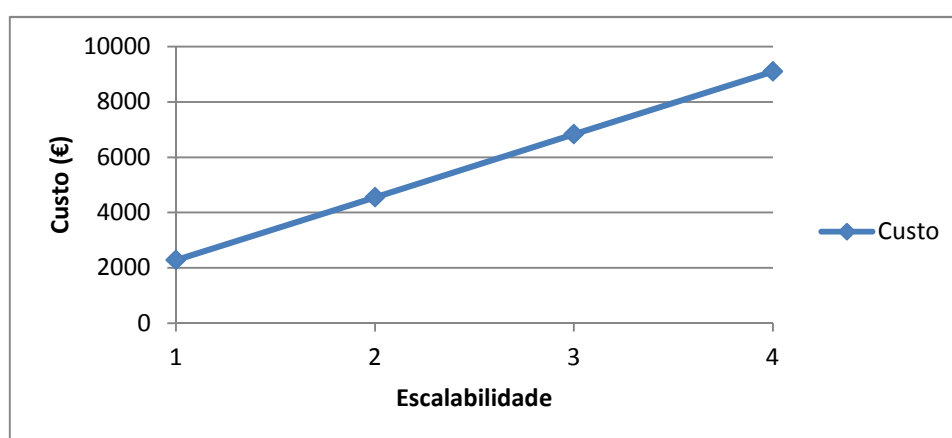


Figura 6.12 — *Estudo do efeito da escalabilidade da máquina, de até quatro vezes o dimensionamento actual, no custo total da máquina.*



Observa-se que o andamento do custo se mantém, também, proporcional à escalabilidade da máquina, sendo possível tirar partido de potências eléctricas de saída superiores sem custo exponencial associado. Para cada uma das dimensões da máquina, foi calculada uma estimativa para o custo associado apenas aos materiais da topologia. Foram considerados os custos específicos utilizados em [21], obtendo-se um valor de 1960,5€ e uma relação Custo/Binário de 4440 €/kN.m para o dimensionamento original.

Através da análise do gráfico seguinte observa-se que, à medida que se escala a topologia, se obtém uma melhor relação binário/custo. Esta característica é apresentada na figura 6.13.

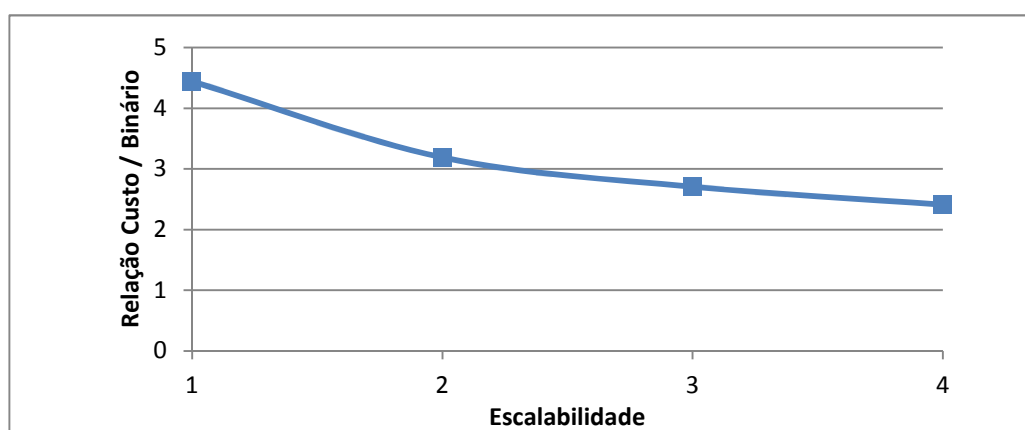


Figura 6.13 — Estudo do efeito da escalabilidade da máquina, de até quatro vezes o dimensionamento actual, na relação Custo/Binário total da máquina.

## 6.4. Topologia de Enrolamento Duplo

Nos capítulos anteriores foi feita a análise da topologia de enrolamento simples e quais as características de saída resultantes do dimensionamento feito no capítulo 5. Neste capítulo, a título de comparação, fez-se um ensaio em vazio da mesma topologia, adicionada de um segundo enrolamento.

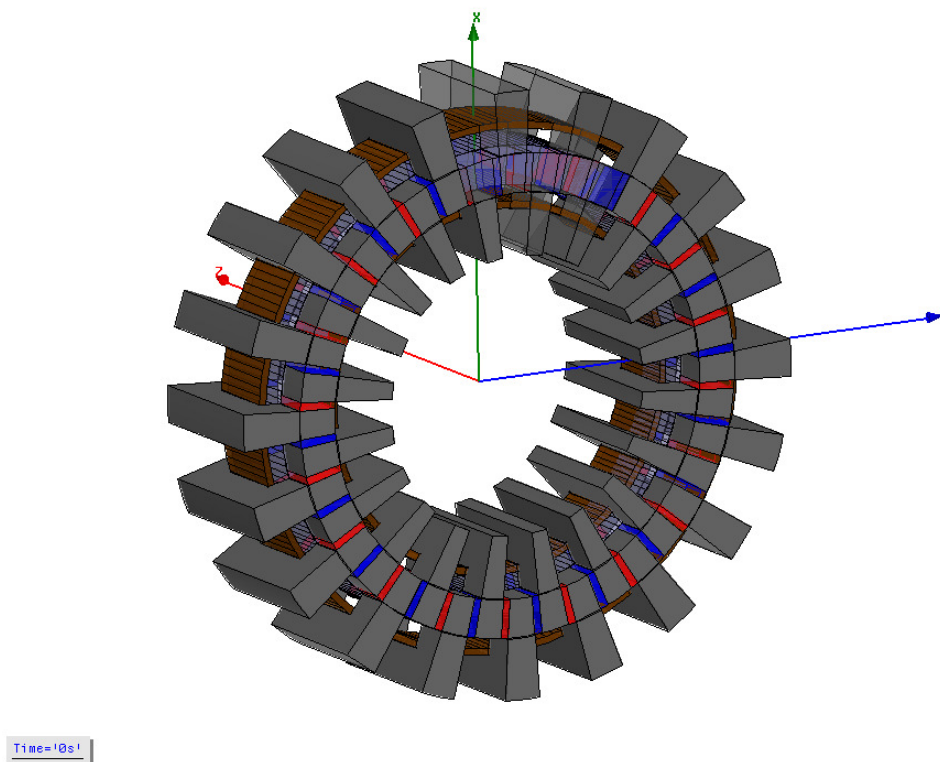


Figura 6.14 — *Modelo de Elementos Finitos para a TFPM de estator duplo e enrolamento duplo.*

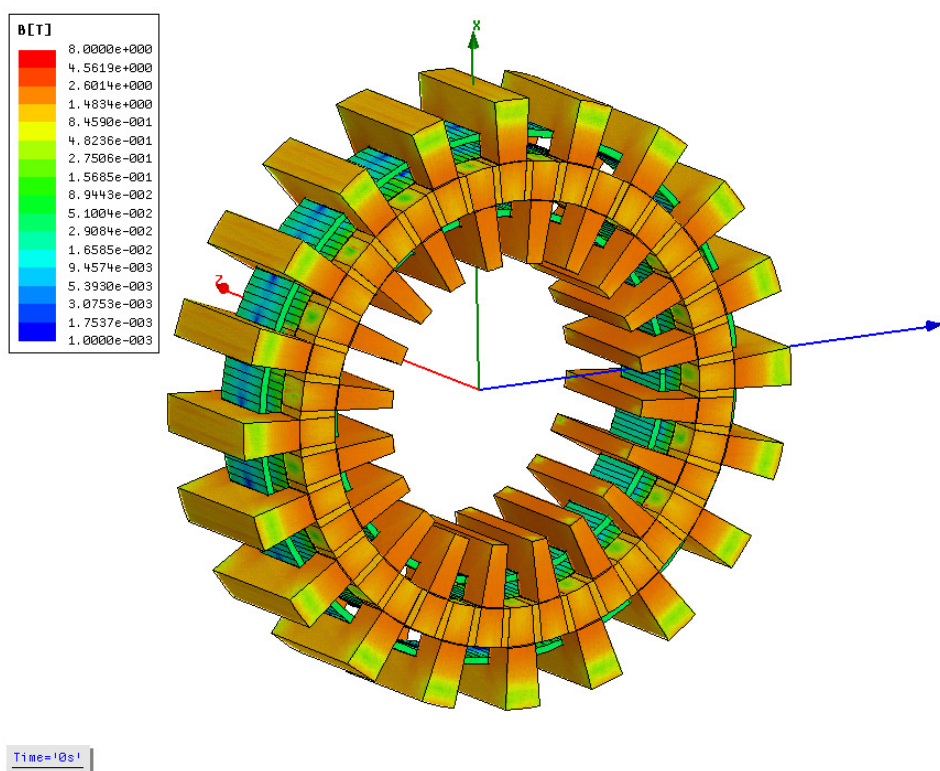


Figura 6.15 — *Densidade de fluxo magnético para a TFPM de estator duplo e enrolamento duplo, no ensaio em vazio.*

Tal como seria esperado, verifica-se que o fluxo ligado pelo segundo enrolamento é aproximadamente o mesmo que o ligado pelo enrolamento principal, resultando o valor de fluxo ligado total, no dobro do valor obtido para a topologia de enrolamento simples.

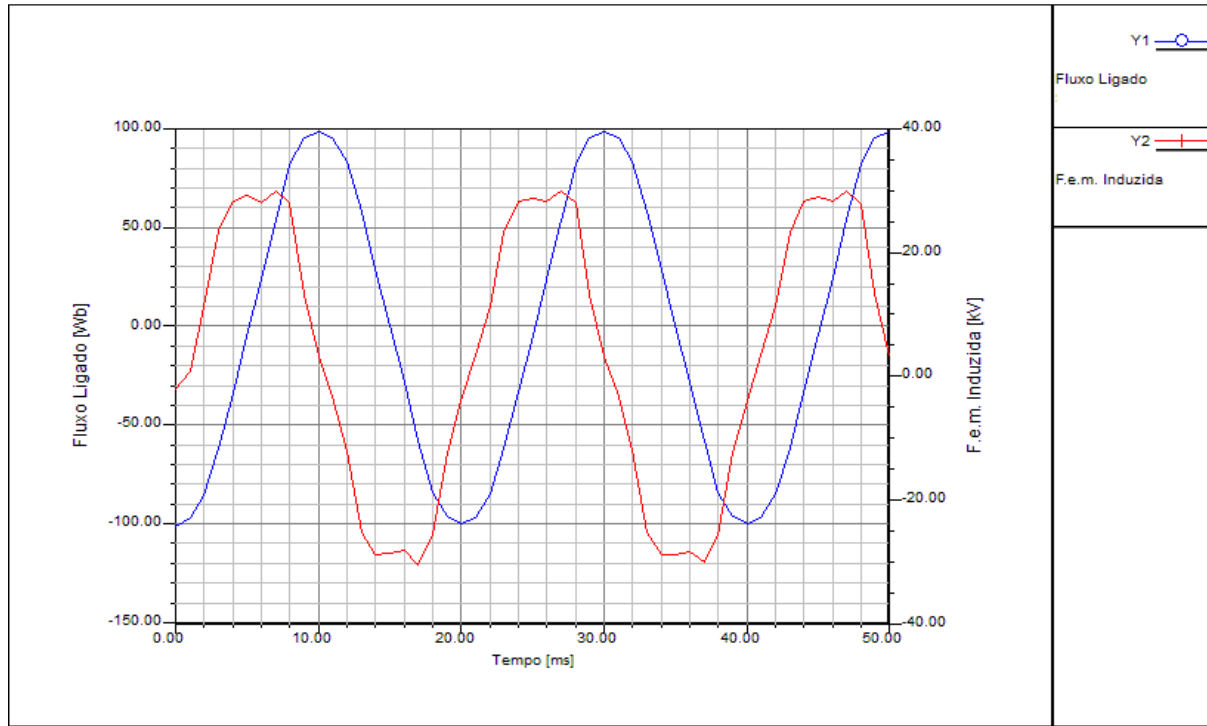


Figura 6.16 — Resultados da simulação para o ensaio em vazio da topologia de enrolamento duplo, com os valores de fluxo ligado e f.e.m. induzida em ambos os enrolamentos.

A f.e.m. total induzida nesta topologia é, assim, o dobro da obtida à saída da configuração com apenas um enrolamento. Porém, o mesmo resultado poderá ser obtido com o aumento do número de espiras do enrolamento principal para o dobro.

Face ao aumento da dificuldade de construção resultante da adição de um segundo enrolamento, este tipo de configuração só fará sentido caso se verifique a ausência de espaço disponível no estator inferior. Pode ainda observar-se que, apesar da introdução de um segundo enrolamento, uma vez que a relutância do circuito magnético não se altera, o binário electromecânico resistente ao accionamento da máquina a 150 rpm mantém-se dentro dos mesmos valores.

## 6.5. Optimização de Densidade de Binário para a Topologia Dimensionada

Nos capítulos anteriores o gerador foi dimensionado e ensaiado de forma a se obter um valor de 10 kW para a potência eléctrica fornecida pela máquina. Apesar de tal objectivo ter sido cumprido, ainda que se tenha verificado alguma discrepância nos valores de potência, com um simples olhar sobre a topologia dimensionada é visível o subaproveitamento do volume da máquina utilizado. O espaço disponível destinado à colocação de enrolamentos poderá ser utilizado mais eficientemente, de forma a se dimensionar uma máquina com um valor de potência eléctrica bastante superior, mantendo o volume da máquina estudada. Reforçando o enrolamento inferior com condutores de diâmetro superior, e colocando um segundo enrolamento no estator superior, como foi visto ser viável no capítulo 6.4, será possível construir um gerador eléctrico, com as mesmas dimensões que o dimensionado para 10 kW, com um valor de potência eléctrica superior e, por conseguinte, com uma densidade de binário também superior.

Sendo o valor da área total disponível para a colocação de enrolamentos dada por:  $A_{\text{Total Enr}} = 2 \times (h_{\text{pólo}} - h_{\text{rotor}}) \cdot w_{\text{separador}}$ , tem-se que o valor para o diâmetro máximo que cada condutor poderá ter será de 1,5 mm. Logo, segundo [25], o valor máximo de corrente que poderá circular nos condutores será de aproximadamente 5 A. Recorrendo à equação (5.49) e utilizando um raciocínio semelhante ao utilizado para o dimensionamento de 10 kW, a carga resistiva a aplicar aos terminais da máquina, que fará circular uma corrente de 5 A nos enrolamentos do estator, terá um valor de 2367  $\Omega$ , sendo esperado um valor de 59,2 kW para a potência eléctrica resultante deste dimensionamento. Na figura 6.17 encontra-se representado o ensaio descrito.

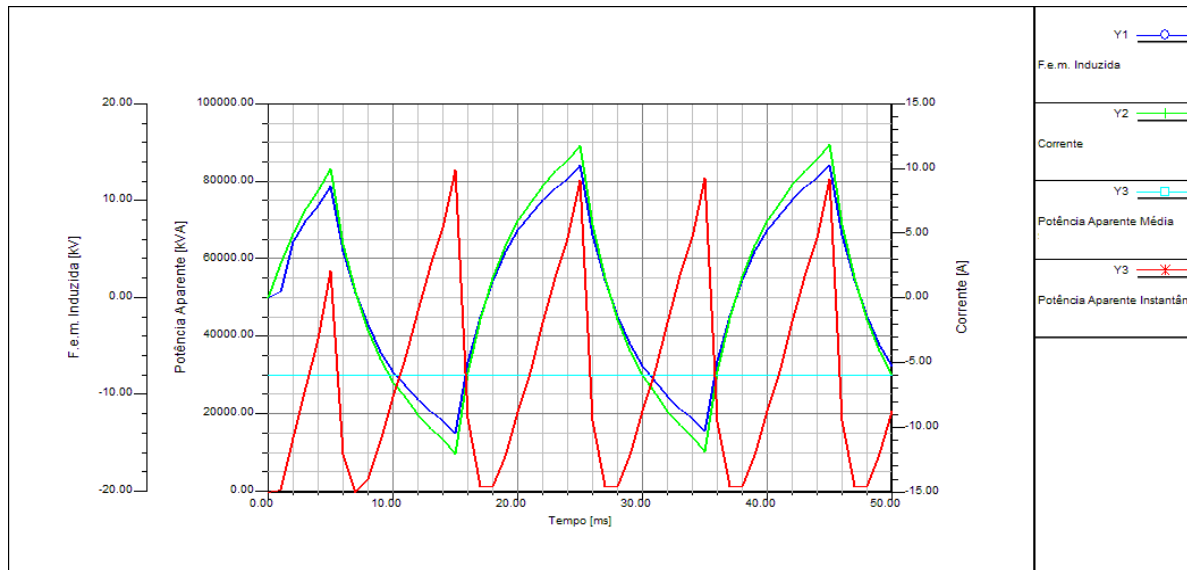


Figura 6.17 — Resultados da simulação para o ensaio em vazio da topologia de enrolamento duplo optimizada, com os valores de f.e.m. induzida, corrente, potência aparente instantânea e potência aparente média em ambos os enrolamentos.

Tal como seria esperado, observa-se um aumento da f.e.m. induzida e da corrente eléctrica a circular na carga aos terminais da máquina. Todavia, tal como nos ensaios anteriores, observa-se uma discrepância entre os valores esperados e os valores obtidos, registando-se uma potência activa média de 30,8 kW. Entre as possíveis causas para este efeito, para além dos formatos irregulares das sinusóides, poderão também estar perdas por efeito de Joule e perdas magnéticas, ambas mais significativas, devido à intensidade da corrente ser bastante superior à do ensaio com carga resistiva do capítulo 6.2.2.

O valor de potência eléctrica obtido resulta num valor de  $T_d = 22499,7 \text{ N.m/m}^3$  para a densidade de binário da máquina.



## Conclusões e Recomendações

### 7.1. Conclusões

**N**A presente dissertação foi estudado e analisado um gerador eléctrico de baixa rotação, para aplicação directa em conversores de energia das ondas oceânicas. Actualmente, são frequentemente utilizadas caixas de velocidades nos dispositivos conversores. Estas revelam ser pontos extra de falha e de despesa regular. Pretende-se, portanto, eliminar as caixas de velocidades, apresentando uma alternativa de aplicação directa eficiente em termos de funcionamento e custo. A introdução de novos magnetos permanentes no mercado, menos dispendiosos e com produtos energéticos cada vez maiores, possibilita o desenvolvimento de máquinas eléctricas com maior densidade de binário. De entre as topologias analisadas, foi seleccionada para o estudo a Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes, pelas suas características bastante favoráveis ao aproveitamento de energia mecânica de velocidade reduzida e variável.

#### 7.1.1. *Ponto de Funcionamento*

Foi conduzido um estudo paramétrico no sentido de se dimensionar e simular um gerador eléctrico de 10 kW. Uma meta importante deste estudo foi encontrar uma relação ideal entre as dimensões do material magnético activo a utilizar e as dimensões dos restantes componentes da máquina. Verificou-se, por simulação, que foram considerados valores

bastante próximos dos óptimos para os parâmetros de construção do gerador. A relação entre as áreas das diferentes secções permitiu a utilização eficaz de medidas viáveis para as distâncias de entreferro e espessura dos magnetos permanentes. Para o dimensionamento do gerador teve-se em conta a saturação dos materiais magnéticos relevantes, garantindo que o gerador funcionará em zonas de funcionamento de não-saturação para valores de potência, corrente e tensão nominais.

### ***7.1.2. Fluxo Ligado e F.E.M. Induzida (Ensaio em Vazio)***

Neste estudo foi considerado que, como em qualquer topologia, o fluxo ligado pelo enrolamento da máquina dependerá, directamente, do magneto permanente seleccionado e do ponto de funcionamento da máquina. Contudo, foi tida em conta a particularidade da topologia apresentar trajectos magnéticos partilhados por pares de circuitos magnéticos. Os resultados obtidos por simulação, no ensaio em vazio, aparentemente, verificam o dimensionamento efectuado. Os valores para o fluxo ligado encontram-se bastante próximos dos esperados, assim como os valores para a f.e.m. induzida, que se verificam directamente proporcionais à variação de fluxo ligado e ao número de espiras do enrolamento.

### ***7.1.3. Potência de Saída***

Para obtenção da potência de saída da máquina, foi feito um ensaio com uma carga resistiva e, posteriormente, com uma carga indutiva. Ambas as cargas foram dimensionadas de forma a que a potência eléctrica aparente de saída atingisse o seu valor nominal. Em ambos os ensaios e, com maior evidência no ensaio com carga indutiva, foram obtidos valores de potência aparente inferiores aos esperados. Este resultado poderá ter origem no facto de a carga à saída afectar a sinusóide da f.e.m. induzida, tornando-a irregular, aliado a possíveis perdas por Joule e perdas de magnetização.



#### 7.1.4. *Densidade de Binário*

Nos estudos efectuados em [21] sobre diversas máquinas com topologia de fluxo transversal, em ambas as classes de diâmetro, foram registados valores de densidade de binário de  $28,9 \text{ kN.m/m}^3$  no ensaio da *TFPM* de magnetos permanentes de superfície e  $50,9 \text{ kN.m/m}^3$  no ensaio de *TFPM* com concentradores de fluxo. Esta gama de resultados fica bastante acima do valor de  $T_d = 4357,35 \text{ N.m/m}^3$  alcançado no ensaio com carga resistiva pelo gerador em estudo (capítulo 6.2.2). O valor de densidade de binário obtido vai de encontro ao que seria esperado visto que a topologia de *TFPM* com concentradores de fluxo em estudo não foi de todo optimizada, em termos de redução e aproveitamento do volume disponível. O modelo utilizado no simulador de elementos finitos foi preparado, inicialmente, para poder ser configurado tanto com apenas um enrolamento, como com enrolamento duplo, pelo que o volume da máquina, em particular o volume ocupado pelo estator superior, poderia ter sido utilizado para albergar um maior número de condutores ou, utilizando o mesmo número de condutores, utilizar enrolamentos com maior capacidade de transporte de corrente eléctrica.

No capítulo 6.5 é feita uma optimização do volume da máquina, sendo possível registar, com o mesmo volume, uma potência activa de  $30,8 \text{ kW}$  para uma carga puramente resistiva aos terminais do gerador. Com uma densidade de binário de  $T_d = 22499,7 \text{ N.m/m}^3$ , esta topologia optimizada já apresenta valores comparáveis aos registados em [21], evidenciando que um ponto chave para um dimensionamento eficiente de uma topologia de fluxo transversal passará pela optimização da relação Potência Eléctrica/Volume.

#### 7.1.5. *Escalabilidade e Relação Custo/Binário*

Um aspecto importante para uma futura implementação da Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes, em conversores de energia das ondas à escala real, é perceber quais os custos que estariam associados e, até que ponto seria viável e eficiente, aumentar as proporções da máquina e, por conseguinte, a sua potência eléctrica nominal de saída.

No estudo do capítulo 6.3, verifica-se que a escalabilidade da máquina, para potências de saída superiores, não prejudicará a sua relação Binário/Custo. Pelo contrário, verifica-se que esta relação apresentar-se-á melhor com o incremento das dimensões da máquina, o que

poderá ser um incentivo importante à sua aplicação em protótipos de proporções significativas.

No estudo de comparação das características de saída das várias topologias [21] é apresentado um valor de 566 €/kN.m para uma topologia idêntica à analisada neste trabalho. De entre as várias topologias analisadas no referido estudo, este foi o melhor valor para a relação Custo/Binário. Verifica-se, assim, que o valor de 4440 €/kN.m para a relação Custo/Binário obtido para este projecto, se situa bastante acima do que seria óptimo. A partir do estudo de optimização do capítulo 6.5 verifica-se que este valor poderá ser substancialmente melhorado, optimizando a potência eléctrica de saída da máquina para o volume da mesma.

## 7.2. Recomendações para Trabalho Futuro

A Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes provou ser uma alternativa de aplicação directa bastante interessante para o aproveitamento de energia das ondas oceânicas, obtendo resultados coerentes com estudos similares e vantagens significativas face a outras topologias.

Alguns aspectos foram, no entanto, negligenciados. Os efeitos das correntes de Foucault, inerentes ao funcionamento de qualquer máquina eléctrica, não foram considerados, tanto no dimensionamento da topologia, como nas próprias simulações do gerador. Também o fluxo de dispersão, presente nas simulações, não foi alvo de análise e cálculo prévios. A consideração destes dois aspectos, numa abordagem futura, poderão resultar num dimensionamento optimizado e mais eficaz da topologia.

As geometrias utilizadas para os concentradores de fluxo e para os pólos em 'U', poderá ser optimizada traduzindo-se num aproveitamento mais eficiente dos magnetos permanentes e numa redução do material magnético activo utilizado.

No presente estudo foi considerada uma velocidade média constante. Para uma melhor aproximação às condições reais de funcionamento, a máquina deverá ser exposta a um movimento de rotação de entrada, de velocidade variável.

De forma a perceber-se em que medida o funcionamento real da máquina poderá diferir no comportamento observado através do simulador baseado no método de elementos finitos, o estudo da aplicação da topologia de *TFPM* em conversores de energia das ondas beneficiará

se for construído um protótipo à escala e feitos ensaios experimentais em ambientes aproximados às condições presentes no meio oceânico.

O trabalho desenvolvido poderá, ainda, dar um contributo para o desenvolvimento de topologias de geradores eléctricos para aproveitamento de energia eólica. A aplicação da Máquina de Fluxo Transversal de Magnetos Permanentes, em sistemas conversores de energia eólica, poderá revelar-se vantajosa, visto grande parte dos requisitos e necessidades consideradas no aproveitamento de energia das ondas serem, também, inerentes à energia eólica.



## Referências Bibliográficas

- [1] CEO, "Potencial e estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal," Centro de Energia das Ondas, 2004.
- [2] CRES, "Ocean Energy Conversion in Europe", Centre for Renewable Energy Sources, 2006.
- [3] Holthuijsen, Leo H. (2007). Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0521860288.
- [4] Richard Boud, "Status and Research and Development Priorities, Wave and Marine Accessed Energy", K Dept. of Trade and Industry (DTI), DTI Report # FES-R-132, AEAT Report # AEAT/ENV/1054, United Kingdom, 2003.
- [5] European Wave Energy Atlas, INETI, <ftp://ftp.ma.hw.ac.uk/pub/denis/WERATLAS.pdf>
- [6] A. Sarmento and J. Cruz, Energia das Ondas - Introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais. Instituto do Ambiente, 2004.
- [7] Friis-Madsen E., Christensen L., Kofoed J.P., Tedd J., "Worlds Largest Wave Energy Project 2007 in Wales", Powergen Europe Conference Proceedings, Cologne, Germany 2006.
- [8] Finavera, "Aquabuoy operation Principle", <http://www.finavera.com/en/wavetech>
- [9] Pelamis Wave Energy, <http://www.pelamiswave.com/>
- [10] M. Sorel, "Process for protecting articles made of Iron or Steel from oxidation", Journal of the Franklin Institute, Philadelphia 1838.
- [11] Richard Baxter, Jim Britton, Deepwater Corrosion Services Inc., "Offshore Cathodic Protection 101", <http://www.cathodicprotection101.com/>
- [12] P. K. Abdul Azis, Ibrahim Al-Tisan, Mohammed Al-Daili, Troy N. Green and Khalid Ba-Mardouf, "Marine Macro Fouling: A Review of Control Technology in the Context of an On-lune Experiment in the Turbine Condenser Water Box of Al-Jubail Phase-I Power/MSF Plants", 3rd Acquired Experience Symposium, Al-Jubail, Saudi Arabia, 4-6 Feb. 2002
- [13] <http://www.pelamiswave.com/project-development/environmental-impact>
- [14] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, "Electric Machinery", 6<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill.
- [15] J. Gieras, R. Wang and M. Kamper, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines", Springer, 2008.
- [16] AXCO Motors, "Axial Flux Technology", [http://www.axcomotors.com/axial-flux\\_technology.html](http://www.axcomotors.com/axial-flux_technology.html)
- [17] M.R. Dubois. Optimized Permanent Magnet Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2004.

- [18] Y. Rang et al, Analytical design and modelling of a transverse flux permanent magnet machines, *IEEE PowerCon 2002*, 13-17 Oct. 2002, Kunming, China, pp. 2164-2167.
- [19] Arshad W. M, Bäckström T., and Sadarangani C, “Analytical design and analysis procedure of transverse flux machines,” *IEMDC’01*, pp. 115-121, 2001.
- [20] K.Y. Lu, E. Ritchie, P.O. Rasmussen and P. Sandholdt, “Modeling and power factor analysis of a single phase surface mounted permanent magnet transverse flux machine”, in *Proc. 2003 IEEE Conf. Power Electronics and Drive Systems(PEDS)*, Vol. 2, pp. 1609-1613.
- [21] M.R. Dubois, H. Polinder and J.A. Ferreira, “Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines,” in *Proc. 2000 Nordic Countries Pow. and Indust. Elec.*, pp. 22-26.
- [22] Anpalaham P., Design of transverse flux machines using analytical calculations & finite element analysis, Tech. Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2001.
- [23] D. Svehkarenko, “On analytical modeling and design of a novel transverse flux generator for offshore wind turbines”, Licentiate thesis, Royal Institute of Technology, Sweden 2007.
- [24] Arnold Magnetic Technologies, “Magnets Cathalogs”, <http://www.arnoldmagnetics.com>
- [25] PowerStream, “Wire Gauge and Current Limits”, [http://www.powerstream.com/Wire\\_Size.htm](http://www.powerstream.com/Wire_Size.htm)